

**ANÁLISIS DE SISTEMAS PARA LA DISIPACIÓN DE ENERGÍAS
EJERCIDAS POR FUERZAS DINÁMICAS**

**Juan Felipe Sánchez Camacho
Pablo Alejandro Quintero García**

**Director de proyecto
Gustavo Andrés Ospina
PhD. Ingeniería Civil**

**Universidad Pontificia Bolivariana
Escuela de Ingeniería
Facultad de Ingeniería Civil
Bucaramanga**

**ANÁLISIS DE SISTEMAS PARA LA DISIPACIÓN DE ENERGÍAS
EJERCIDAS POR FUERZAS DINÁMICAS**

**Juan Felipe Sánchez Camacho
Pablo Alejandro Quintero García**

**Director de proyecto
Gustavo Andrés Ospina
PhD. Ingeniería Civil**

Visto bueno: _____

Proyecto de grado para optar por el título de ingeniería civil

**Universidad Pontificia Bolivariana
Escuela de Ingeniería
Facultad de Ingeniería Civil
Bucaramanga**

Tabla de contenido

1. Introducción	8
2. Objetivos	9
2.1 Objetivos Generales	9
2.2 Objetivos Específicos.....	9
3. Marco Teórico	10
3.1 Sistemas de control dinámico sísmico	10
3.1.1 Sistemas de control pasivo:.....	11
3.2 Disipadores viscosos.....	15
3.3 Disipadores visco elásticos.....	19
3.4 Comparación cerchas con y sin disipadores.....	20
3.4.1 Amortiguamiento aumentado	21
3.4.2 Amortiguamiento no proporcional	22
3.4.3 No linealidad en los disipadores	23
3.5 Parámetros de un disipador	23
3.5.1 Desplazamiento máximo	23
3.5.2 Rigidez efectiva.....	24
3.6 Energía disipada por ciclo (EDC).....	24
4. Modelado	26
4.1 Atributos de la estructura	26
4.1.1 Columnas.....	27
4.1.2 Vigas	27
4.2 Paso a paso del modelado.....	27
5. Análisis de resultados.....	31
6. Conclusiones.....	37
7. Recomendaciones	38
Bibliografía	39
Anexos	42

Tabla de Figuras

Fig. 1 Sistemas de control Sísmico (Pardo Galvis, 2008)	10
Fig. 2 USC Teaching Hospital (USA) (California)	11
Fig. 3 Sistema de control pasivo de neopreno zunchado (Villareal Castro & Oviedo Sarmiento, 2009)	12
Fig. 4 Comparación de comportamiento estructural con aislamiento basal (Silverio, 2011)	13
Fig. 5 Sistema de control pasivo por fricción (Villareal Castro & Oviedo Sarmiento, 2009)	13
Fig. 6 Sistemas inerciales acoplados clásicos (TMD) y tanques elevados (Villareal Castro & Oviedo Sarmiento, 2009)	14
Fig. 7 Disipador pasivo (Villareal)	15
Fig. 8 Disipadores viscosos instalados (CDV Ingeniería Antisísmica)	16
Fig. 9 Disipador viscoso previo a instalar y amortiguador viscoso instalado en la estructura (Choquepoma & Beremiz, SlideShare, 2015)	16
Fig. 10 Ciclos de carga y descarga en diferentes amortiguadores (Dynamic Isolation System, 2007)	18
Fig. 11 Partes principales de un disipador viscoso (de la Llera, 2010)	19
Fig. 12 Aislador Elastomérico (Nelson, 2012)	19
Fig. 13 Grados de libertad de un piso individual que conforman las estructuras tradicionales. (Universidad de Morón, 2014)	21
Fig. 14 Disipador de energía, edificio Titanium en Santiago de Chile (Vargas Bello)	22
Fig. 15 Histéresis por ciclo, (Dynamic Isolation System, 2007)	25
Fig. 16 Representación del modelo utilizado.	26
Fig. 17 Definición de Rubber Isolator	28
Fig. 18 Definición de propiedades del Rubber Isolator	28
Fig. 19 Opción para dibujar el Rubber Isolator	29
Fig. 20 Selección y visualización de nodos	29
Fig. 21 Sismo aplicado al modelo (Vibration Data, S.f)	31
Fig. 22 Comparación del comportamiento de la cortante en el modelo control y con disipador #1 y #2	32
Fig. 23 Comparación de momentos entre el modelo de control y con disipador #1 y #2	33
Fig. 24 Comparación de las derivas entre el modelo de control y el disipador #1 y #2	34
Fig. 25 Comparación de desplazamiento entre el modelo de control y con disipador #1 y #2	35
Fig. 26 Catalogo comercial de DIS (Dynamic Isolation System)	42

Índice de Tablas

Tabla 1 Parámetros del aislador (Dynamic Isolation System)	30
Tabla 2 Propiedades del disipador	30
Tabla 3 Comparación de cortantes	36
Tabla 4 Comparación de momentos	36
Tabla 5 Comparación de derivas	36
Tabla 6 Comparación de desplazamientos.....	36

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: Análisis de sistemas para la disipación de energías ejercidas por fuerzas dinámicas

AUTOR(ES): Pablo Alejandro Quintero García
Juan Felipe Sánchez Camacho

FACULTAD: Facultad de Ingeniería Civil

DIRECTOR(A): PhD Gustavo Andrés Ospina Idárraga

RESUMEN

En el presente documento se dará a conocer distintos aspectos teóricos y matemáticos relacionados a disipadores de energía, así como la importancia de estos en las construcciones y su comportamiento ante los eventos dinámicos que puedan suceder por el hombre o la naturaleza, haciendo énfasis en los eventos sísmicos; se presentara una comparación en el comportamiento de una estructura modelada mediante un software especializado, del cual se tomaran datos de las principales características que se ven afectadas en una estructura al ser sometida a un evento sísmico de cualquier magnitud, ejercicio que será realizado en 3 situaciones que corresponden a: Estructura de control (sin disipadores), estructura con disipador viscoso y estructura con disipador en bases de neopreno. El fin de este documento es presentar las variaciones de las características que sufre una estructura al utilizar disipadores de energía, demostrar que esta inclusión puede reducir riesgos y pérdidas estructurales, económicas y en el peor de los casos humanas.

PALABRAS CLAVES:

Disipador, sismo, histéresis, dinámica, estructura, modelado, energía, rigidez, amortiguamiento, ciclo

V° B° DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

TITLE: Analysis of systems for the dissipation of energies exerted by dynamic forces

AUTHOR(S): Pablo Alejandro Quintero Garcia
Juan Felipe Sanchez Camacho

FACULTY: Facultad de Ingeniería Civil

DIRECTOR: PhD Gustavo Andres Ospina Idárraga

ABSTRACT

This document presents different theoretical and mathematical aspects related to energy dissipator, as well as the importance of these in the constructions and their behavior in the presence of dynamic events caused by man or nature, emphasizing in seismic events, we will present a comparison of the behavior of a structure modeled by specialized software, from which we will be taking some data of the main characteristics that are affected in a structure by a seismic event of any magnitude. This Process will be done on 3 occasions corresponding to: Control Structure (Without dissipators), damper exponential, Rubber Isolator. The purpose of this document is to present the variations of the characteristics of a structure when using energy dissipators, to show that this inclusion can reduce structural, economic and worst-case risks and losses in human beings

KEYWORDS:

Dissipator, earthquake, hysteresis, dynamics, structure, modeling, energy, stiffness, damping, cycle

V° B° DIRECTOR OF GRADUATE WORK

1. Introducción

A la naturaleza se le debe admirar, proteger, pero sobretodo respetar, pues puede cambiar fácilmente de ser dócil a ser peligrosa, es algo que como ingenieros civiles siempre hemos tenido presente. Tifones, huracanes, sismos, maremotos, erupciones volcánicas, son algunos ejemplos de lo atroz que puede llegar a ser el planeta, por ello es importante la investigación y conocer el enemigo, saber cómo actuar, responder y prevenir los desastres naturales.

En la actualidad hemos recibido golpes constantes y fuertes gracias a la gran cantidad de sismos que ha presenciado el mundo los últimos años, algunos tan fuertes que destruyen ciudades enteras y otros que apenas son perceptibles. Nuestro trabajo como ingenieros civiles es dotar a las ciudades de edificios capaces de soportar los sismos y las cargas dinámicas que traen consigo, reducir los daños materiales y la mortalidad por un desastre natural de este tipo.

Sismos como el sufrido por Ecuador el 20 de abril del año 2016, que termino en desastre estructural y con muchas pérdidas de vidas, demuestran que en cualquier momento y en cualquier lugar una fuerza sísmica puede aparecer y destruir estructuras, aunque estén bien diseñadas y construidas. La otra cara de la moneda la podemos ver en Chile, donde a pesar de ser azotados constantemente por sismos de diferente magnitud y duración, las estructuras soportan eficientemente estas cargas energéticas gracias no solo a su diseño sino también al uso de sistemas disipadores de energía, como el edificio Titanium quien cuenta con una serie de sistemas de aislamiento para reducir considerablemente el daño que puedan sufrir los componentes estructurales de la construcción.

Para reducir los esfuerzos a los que son sometidos los elementos estructurales de los edificios gracias a las cargas sísmicas, son utilizados comúnmente los sistemas de control pasivos, ya que esto genera una ventaja económica para el manejo de las fuerzas dinámicas aplicadas a placas, vigas, columnas, etc. Ya que los requisitos de diseño exigidos por la norma NSR-10 (Red Sismológica Nacional, 2010) son bastante exigentes, como secciones muy grandes, cuya rigidez obliga a tener elementos que soportan altas cargas de cortante y flexión.

En el presente proyecto se presenta el análisis de diferentes mecanismos antisísmicos y su posterior modelado bajo un software especializado en estructuras, mediante una comparación en la respuesta del modelo diseñado con y sin mecanismos de disipación de energía daremos a conocer que tan útiles resultan dichos elementos.

2. Objetivos

2.1 Objetivos Generales

- Analizar numéricamente los sistemas de disipación de energía y su efecto en estructuras afectadas por fuerzas dinámicas como sismos.

2.2 Objetivos Específicos

- Realizar una revisión de literatura sobre diferentes sistemas pasivos y activos para el control de vibraciones en estructuras civiles.
- Estudiar ejemplos de sistemas en el mundo y su desempeño hasta el momento.
- Utilizar software de modelación estructural para la modelación de varios de los sistemas de disipación de energía identificados anteriormente.
- Comparar la respuesta dinámica de estructuras con y sin disipadores de energía ante diferentes tipos de excitación sísmica.

3. Marco Teórico

3.1 Sistemas de control dinámico sísmico

Las excesivas vibraciones en las estructuras pueden causar daños en estas tanto en los elementos estructurales y los no estructurales. La masa, rigidez, amortiguamiento son parámetros que deben ser modificados en una estructura para evitar dichas vibraciones. Estas deben ejercer una buena resistencia, ductilidad y rigidez. En la actualidad se ha investigado diferentes alternativas para disminuir estos problemas. Tenemos los sistemas de control activo, semi activo, híbrido y pasivo (Disipadores de energía tipo adas para diseño sísmico de estructuras (Pardo Galvis, 2008)). Muchos de los cuales ya han sido utilizados en muchos países como Japón, Estados Unidos, China, Chile, etc. En la figura 1 se puede observar cómo se dividen a grandes rasgos los sistemas de control estructural o sistemas disipadores.

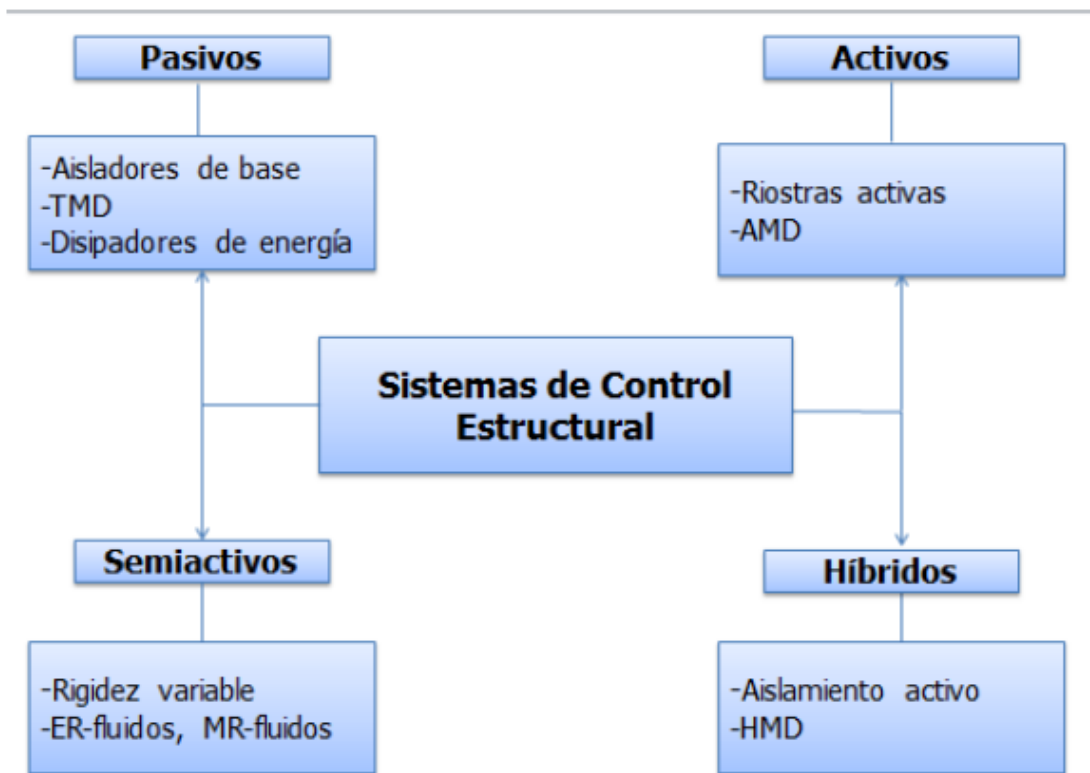


Fig. 1 Sistemas de control Sísmico (Pardo Galvis, 2008)



Fig. 2 USC Teaching Hospital (USA) (California)

La figura 2 muestra un hospital en California (EU), el cual cuenta con sistemas disipadores de alta calidad gracias a los cuales se ha logrado mantener en pie, aunque la región donde está construido es constantemente atacada por sismos fuertes.

3.1.1 Sistemas de control pasivo:

Los sistemas de control pasivo son elementos de reacción, esto quiere decir que no es posible controlar su comportamiento ya que estos, como su nombre lo indica, reaccionan a los eventos dinámicos y solo dependen de las condiciones en las que trabajan cada sistema de control; la tarea principal de estos mecanismos es afectar las propiedades dinámicas de los edificios y reducir la respuesta estructural para evitar que el cuerpo entre en armonía con las ondas de vibración y generen daños graves, en este punto es donde entra la compensación económica por instalar estos mecanismos de control, dado que reducen considerablemente los daños y posteriores reparaciones de la estructura.

Existen tres (3) tipos de sistemas de control pasivos, control pasivo con aislamiento en la base, control pasivo con sistemas inerciales acoplados y control pasivo con disipadores de energía.

3.1.1.1 Control pasivo con aislamiento en la base:

Este tipo de mecanismo de control se identifica por aislar la base de la estructura con respecto al suelo, mediante elementos flexibles que desacoplan los elementos de la base para protegerla de los efectos de los sismos. El sistema tiene flexibilidad en los planos horizontales, pero se mantiene rígido en el plano vertical, esto lleva a un alargamiento al periodo fundamental y reduce la entrada de energía

al sistema estructural con el fin de recibir vibraciones con valores más normales y manejables por los elementos. Este tipo de control es recomendado para estructuras rígidas construidas en terrenos firmes, donde las ondas sísmicas viajan con mayor energía; es importante aclarar que el principal problema que tienen las estructuras de gran altura o anchura es que tienen un momento de volteo mayor y por el movimiento dinámico pueden variar su centro de masa y perder equilibrio hasta su desplome, mediante el uso de este sistema de control es posible reducir estos desplazamientos del centro de masa para evitar catástrofes.

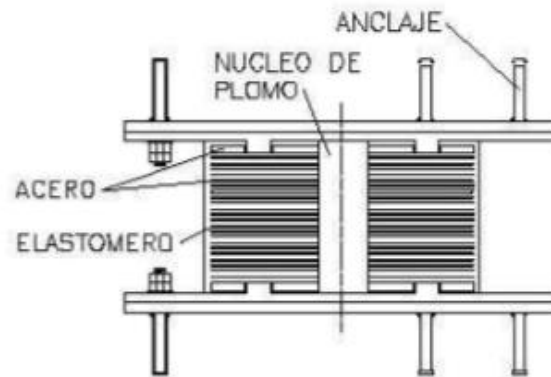


Fig. 3 Sistema de control pasivo de neopreno zunchado (Villareal Castro & Oviedo Sarmiento, 2009)

Existen diferentes modelos de controles pasivos con aislamiento en la base, pero los más utilizados son las bandas de neopreno con corazón de plomo similar al presentado en la figura anterior (Fig. 3), quienes se encargan de reducir el movimiento que sufre la estructura por las vibraciones del suelo ya que tiene los ejes horizontales libres y flexibles pero su eje vertical se encuentra rígido por el corazón de plomo.

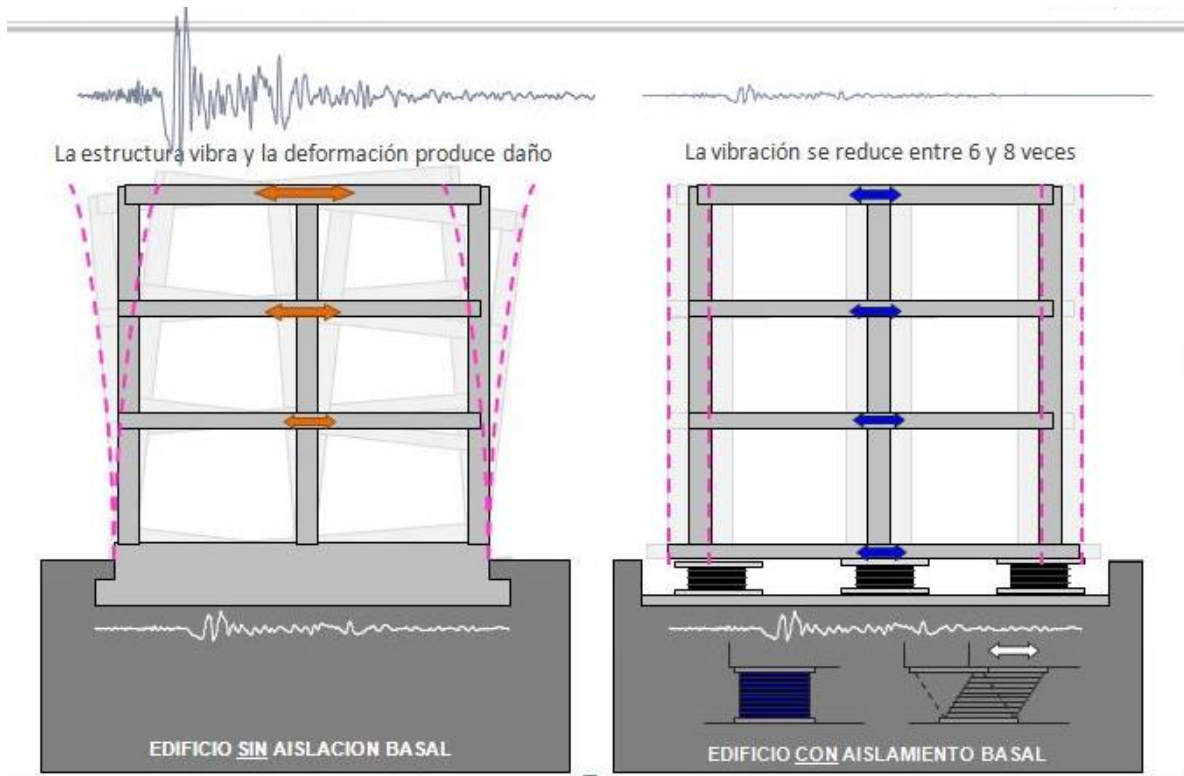


Fig. 4 Comparación de comportamiento estructural con aislamiento basal (Silverio, 2011)

En la figura 4 se puede observar una reducción considerable en las vibraciones gracias al uso de sistemas de aislamiento en la base, ya que permite que la parte alta del edificio no sea golpeada por fuerzas demasiado altas y que producen daños estructurales. Otro modelo de control es el de fricción que, a diferencia de los sistemas de neopreno, limita la energía transmitida por el sismo mediante la fricción de placas especiales y transforma dicha energía en calor, además es considerablemente más económico que el anterior ejemplo.

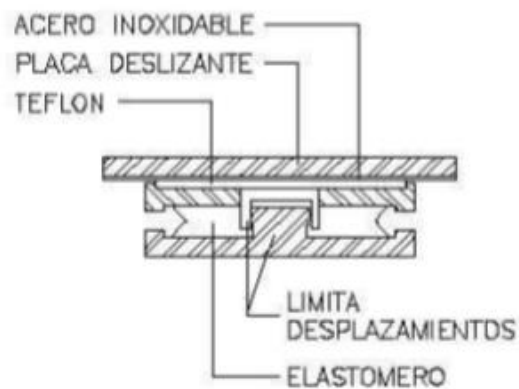


Fig. 5 Sistema de control pasivo por fricción (Villareal Castro & Oviedo Sarmiento, 2009)

El último modelo más utilizado es el de control pendular, que reduce la afección que producen los sismos mediante un movimiento pendular de la estructura, que junto con el peso propio de los elementos genera fricción para aumentar el amortiguamiento.

3.1.1.2 Control pasivo con sistemas inerciales acoplados:

Los sistemas inerciales acoplados se ven representados estructuralmente como una carga muerta con libre movimiento horizontal que se dirige inercialmente al sentido contrario en el que se mueve la estructura, como lo muestra la figura 6, esto ayuda a estabilizarla durante un evento sísmico. También conocido como Tuned Mass Damper (TMD), el control pasivo con sistemas inerciales acoplados se identifican por tener un oscilador con un grado de libertad, un mecanismo de muelle y un mecanismo de amortiguamiento; un ejemplo actual de este tipo de control son los tanques elevados, que consiste en una carga de agua ubicada en lo alto de los edificios que al recibir un estímulo dinámico, se mueve en sentido contrario de la onda, esto y junto al peso de la masa de agua, equilibra el edificio reduciendo su capacidad armónica y aumentando su amortiguamiento. Se debe tener en cuenta que estos mecanismos tienen un peso agregado considerable al edificio, puesto que para ser efectivos su carga muerta debe equilibrar el centro de masa de la estructura y no crear una desventaja ante estos eventos. (Villareal Castro & Oviedo Sarmiento, 2009).

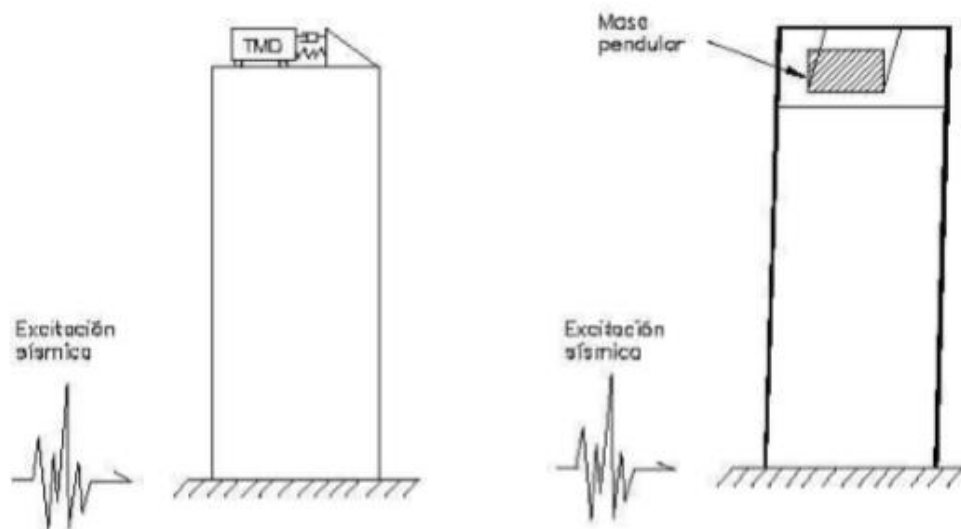


Fig. 6 Sistemas inerciales acoplados clásicos (TMD) y tanques elevados (Villareal Castro & Oviedo Sarmiento, 2009)

3.1.1.3 Control pasivo por disipadores:

Los disipadores pasivos son elementos estructurales que responden a los eventos dinámicos, como lo muestra la figura 7, reduciendo la energía descargada por las ondas sísmicas al edificio. Principalmente se usan en edificios públicos como hospitales, centros sociales y políticos, aunque en la actualidad es común ver este tipo de controles en edificios civiles como oficinas y viviendas, especialmente en lugares donde son azotados constantemente por fenómenos naturales como sismos, tifones, tormentas tropicales, etc.



Fig. 7 Disipador pasivo (Villareal)

3.2 Disipadores viscosos

Los disipadores de tipo viscosos o de fluido viscoso, son un ejemplo de la evolución que ha tenido la ingeniería anti sísmica usando tecnología de otros campos y con otros fines para asimilarla a la construcción de estructuras más seguras y duraderas. Al ser incorporados los disipadores, estos le añaden a la estructura en cuestión rigidez y resistencia ante los eventos dinámicos, ya sean sismos, tifones u otras situaciones que pongan a prueba los diseños y esquemas de seguridad impuestas por los organismos de control y los ingenieros encargados del trabajo de construcción.

Originalmente la tecnología que se utiliza para este sistema fue desarrollada por la industria militar con el fin de reducir el impacto a los ejes de transmisión en vehículos pesados (Disipadores de energía fluido viscoso (Burgos)); aplicando algunas modificaciones a los diseños originales del sistema, se logró crear un modelo de tipo capsula o cámara con pistón que produce una presión de amortiguamiento al intentar cruzar el líquido viscoso a través del orificio u orificios, esto no aumenta las cargas sísmicas y equilibra la deformación estructural.



Fig. 8 Disipadores viscosos instalados (CDV Ingeniería Antisísmica)

Un disipador viscoso (como el de la figura 8 y figura 9) consta de dos cámaras principales separadas por un pequeño orificio entre ellas, una de las cámaras contiene un fluido viscoso similar a un aceite que es empujado por un pistón en dirección a la cámara contraria y obligada a pasar a través del pequeño orificio; la resistencia que ejerce el fluido viscoso al entrar genera una fuerza en contra del movimiento de empuje del pistón lo cual permite una estabilidad en el mecanismo.

Este tipo de disipadores son puestos en lugares específicos de la estructura, generalmente en las ubicaciones donde los elementos son sometidos a mayor esfuerzo dinámico; también se pueden ver trabajando en conjunto con otro tipo de disipadores como los disipadores de fricción que son puestos en posición diagonal dentro de los marcos de la cercha de acero. El fluido que se encuentra dentro de la cámara debe tener una viscosidad relativa alta, la cual debe ser mayor conforme el esfuerzo al que será sometido el sistema aumente.



Fig. 9 Disipador viscoso previo a instalar y amortiguador viscoso instalado en la estructura (Choquepoma & Beremiz, SlideShare, 2015)

Existen otro tipo de disipadores viscosos los cuales se diferencian por su forma de trabajar dentro de la cámara, en este tipo de sistema la fuerza amortiguadora se genera por la resistencia a la compresión del fluido viscoso, esto genera mayores fuerzas negativas al movimiento dinámico, pero requiere mayor mantenimiento puesto que puede llegar a generar tanta presión a los elementos del sistema que se podría fracturar la cámara dejando inutilizable el disipador.

El trabajo de este tipo de disipador es generar fuerzas contrarias al movimiento del edificio, los cuales son generados por ondas sinusoidales sísmicas, movimientos de vela en tifones o impactos sonoros de alta magnitud, todo esto sin alterar el centro de masa de la estructura o la forma final de esta. El uso de disipadores viscosos ha sido aceptado por la comunidad científica y de ingenieros, como una solución práctica a eventos dinámicos constantes. Lo ideal para el comportamiento de un disipador viscoso es que cumpla la cortante mínima en la base y la distorsión entre pisos, esto con el fin que actúe de manera apropiada y no en contra del edificio ante un sismo muy severo, además gracias a la normativa de la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles, la instalación y mantenimiento de dicho sistema disipador debe estar encargado a un ingeniero competente en el tema, es decir que se desenvuelva fácilmente en el campo con el fin de optimizar al máximo el desempeño del mecanismo.

Aunque existen diversos diseños de disipadores viscosos, todos tienen el mismo fin que es aumentar el amortiguamiento del edificio para reducir el desplazamiento y los esfuerzos del edificio, por consecuente también reduce daños; este amortiguamiento puede darse entre el 20 y 40% (Castro, 2016), si el amortiguamiento es menor al 20% no se aconseja instalar estos dispositivos pues sería un gasto innecesario dada su utilidad, por el contrario si supera el amortiguamiento del 40% tampoco se deberían instalar puesto que se necesitarían demasiados en la estructura y esto aumentaría el coste de construcción del edificio o de instalación y mantenimiento de los equipos.

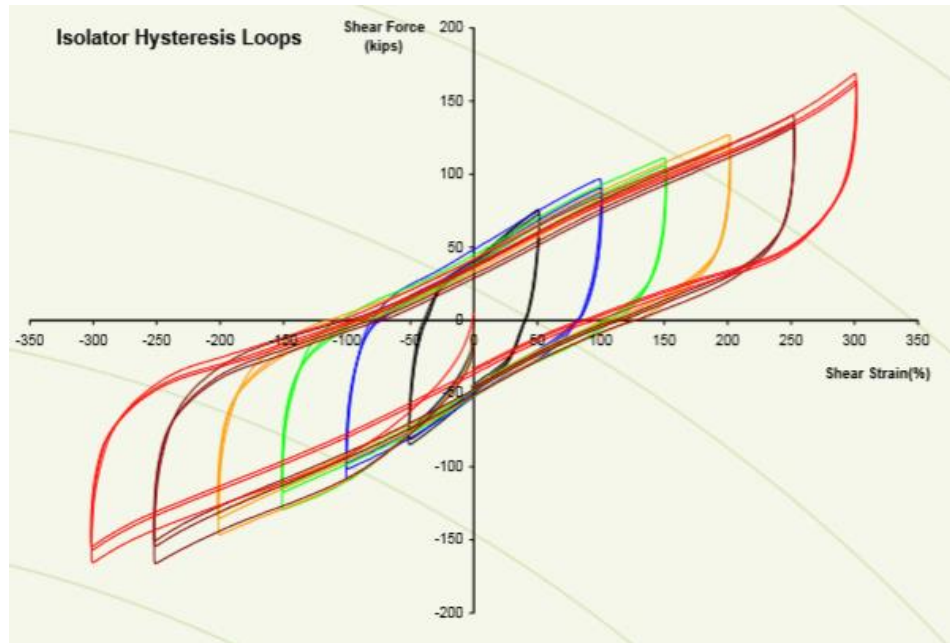


Fig. 10 Ciclos de carga y descarga en diferentes amortiguadores (Dynamic Isolation System, 2007)

En la figura 10 se puede observar las diferencias en las histéresis que se obtienen a partir de distintos amortiguamientos y como cambia el área encerrada bajo la curva esfuerzo - deformación, por consiguiente, se puede concluir que a mayor amortiguamiento mayor área encerrada por ciclo de carga y descarga.

Principalmente las estructuras que requieren este tipo de dispositivos son los edificios de salud, ya que en un evento sísmico los hospitales serán de extrema importancia para salvar vidas; también es importante destacar que los mecanismos de este tipo se pueden instalar en edificaciones ya existentes mediante un acondicionamiento en la estructura, esto no es posible con algunos otros disipadores ya que su instalación es más compleja. Después de cada evento sísmico de magnitud importante o de poca profundidad, se debe realizar una calibración del sistema y trabajo de mantenimiento.

El funcionamiento de un sistema de disipación viscoso se basa en la resistencia que tiene un elemento, como un pistón, en moverse a través de un medio que ejerza mayor resistencia y fricción que el aire o el agua; como se identifica el sistema, el medio a través del cual debe moverse el elemento es de carácter viscoso.

La viscosidad es la resistencia a fluir y representa una característica de los fluidos densos, también indica la resistencia de un fluido a ser comprimido bajo su propio peso. (Laborbedarf Bochem, S.f.)

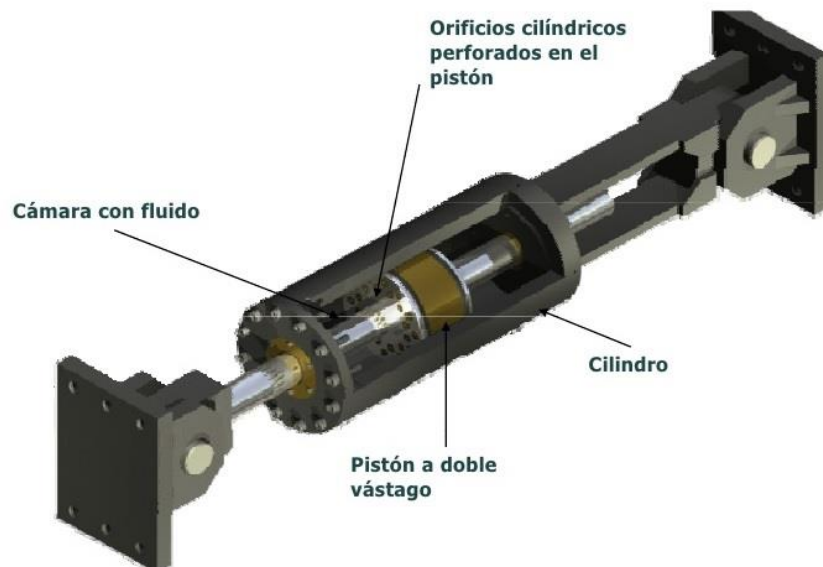


Fig. 11 Partes principales de un disipador viscoso (de la Llera, 2010)

La figura 11 presenta las principales partes de un disipador viscoso, así como una idea general de la distribución de dichas partes.

3.3 Disipadores visco elásticos

Los disipadores visco elásticos era una tecnología aeroespacial, también conocido como disipadores por velocidad, la idea de amortiguamiento para este disipador es ejercer presión sobre un elemento que pasa a través de un medio viscoso, lo cual genera esfuerzos en sentido contrario al movimiento que, a su vez, lo hace elástico puesto que vuelve a su estado original. La cantidad de amortiguamiento depende de la velocidad con que se mueva el elemento amortiguado.



Fig. 12 Aislador Elastomérico (Nelson, 2012)

La figura 12 muestra un diseño de aislador visco elástico común junto con sus principales partes.

Existen diferentes tipos de disipadores visco elásticos, varían desde su tamaño hasta el medio por el cual pasa el elemento y su capacidad de amortiguamiento. Los medios más utilizados son los de copolímeros (macro molécula que se crea por la unión repetitiva de moléculas), o material vidrioso plástico. Son unos de los sistemas actuales con mayor tecnología, son materiales industriales con una capacidad estable ante ciclos repetidos de carga y descarga, experimentan un alargamiento moderado antes del punto de fluencia seguido de una deformación irreversible pero que se ven afectados por los cambios de temperatura dado que esto rompe las cadenas de uniones entre las moléculas que componen su medio y generan un desgaste exponencial, es por esto que requiere una temperatura estable. Puede ser uno de los más seguros, pero también es uno de los más tediosos en cuanto al mantenimiento dado su fragilidad ante la temperatura en la que está presente.

La carga cortante a la que es sometido el edificio durante un sismo es absorbida por las grandes deformaciones que permite el aislador sísmico. La energía transmitida desde la base es disipada como energía cinética en el aislador y es mínima la energía que se transmite al resto de la estructura.

3.4 Comparación cerchas con y sin disipadores

Las estructuras pueden variar su comportamiento ante diferentes estímulos dinámicos gracias a diferentes características previstas en las mismas, tales como las dimensiones de sus elementos, el peso del edificio adicionando las cargas soportadas, el centro de masa, localización, entre otras; de las características principales a tener en cuenta para conocer el desempeño de una estructura frente a un evento sísmico, se encuentra la cantidad de grados de libertad que pueda tener, es diferente tratar un edificio simplificado a un grado de libertad (1GDL) a trabajar con otra que tenga múltiples grados de libertad (MGDL).

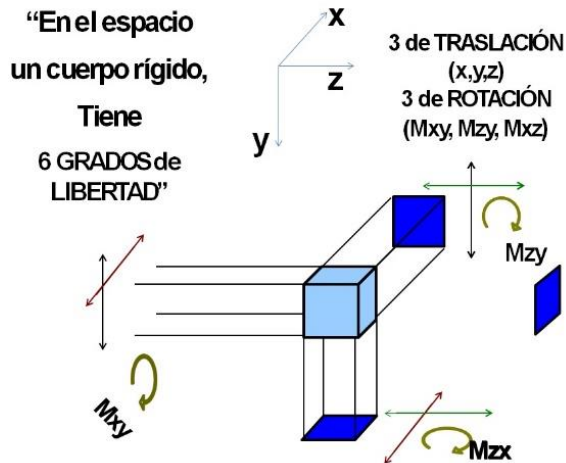


Fig. 13 Grados de libertad de un piso individual que conforman las estructuras tradicionales.
(Universidad de Morón, 2014)

Aclarando, las estructuras poseen múltiples grados de libertad, a su vez cada piso de la estructura se puede simplificar a un grado de libertad facilitando su estudio, esto nos deja grados de libertad individuales para cada piso, pero relacionados con los demás, al hacer esto las estructuras deben ser sometidas a sistemas de disipación de energía, ya que su estabilidad, a medida que aumentan dichos grados de libertad, disminuye por su variación en el centro de masa. El análisis de un edificio puede arrojar grandes diferencias si se trabajan los mismos elementos con y sin disipadores ya que la idea de estos sistemas es alterar el comportamiento de los elementos, de modo que la estructura sea capaz de soportar cargas dinámicas en diferentes sentidos, continuamente y con el menor desgaste posible.

Entre las diferencias que se presentan al comparar los elementos estructurales con y sin disipadores podemos resaltar:

3.4.1 Amortiguamiento aumentado

Como principal tarea de los sistemas disipadores, el aumento en la capacidad de amortiguamiento de una estructura es pieza clave para diferenciarlas de las edificaciones tradicionales. Esta característica es especialmente notable en estructuras altas y de gran envergadura, pues estas poseen mayores grados de libertad y conlleva a que los radios de amortiguamiento lleguen o superen niveles críticos por lo que es necesaria la implementación de sistemas disipadores de energía.

El amortiguamiento de una estructura es estudiado con detalle por parte de los diseñadores e interventores, un edificio con poco amortiguamiento es susceptible a desgastarse con mayor facilidad y velocidad comparado con un edificio similar,

pero con mayor amortiguamiento. Al incluir los disipadores no solo agregan amortiguamiento, sino que también lo redistribuyen de forma que se reparta de una mejor manera para que la estructura no colapse. La siguiente figura muestra un ejemplo de los disipadores que tiene el edificio Titanium en Chile.



Fig. 14 Disipador de energía, edificio Titanium en Santiago de Chile (Vargas Bello)

3.4.2 Amortiguamiento no proporcional

Normalmente, en un diseño estructural la capacidad de amortiguamiento es calculada proporcionalmente para facilitar el equilibrio y la estabilidad, pero al adicionar distintos disipadores, estos alteran las cargas soportadas por ciertos elementos estructurales, por lo que desbalancean lo planteado en estructuras tradicionales. Los elementos que no están conectados a los disipadores presentan un menor amortiguamiento comparados con los que sí están conectados, dado que los disipadores aumentan esta característica para la zona circundante.

En cuanto a la proporción del amortiguamiento, la estructura tradicional trabaja mejor por la simplicidad de su aplicación, además que el estudio de vibraciones de los elementos se facilita, mientras que, en una estructura con disipadores, los estudios de las vibraciones deben ser detallados para conocer la ubicación de las posibles fallas de amortiguamiento y solucionarlas. Un amortiguamiento proporcional no debe ser asumido para las estructuras con disipadores puesto que puede llevar a daños en los elementos.

3.4.3 No linealidad en los disipadores

La fluencia por eventos dinámicos y cargas dadas genera alteraciones lineales y no lineales en los edificios tradicionales, pero con los disipadores estas alteraciones solo se ejecutan en momentos no lineales de velocidades y posición, lo que ayuda al estudio del comportamiento estructural, aunque sigue siendo un trabajo arduo donde es imperativo realizar un análisis tiempo-historia para sacar el mayor provecho de la situación.

3.5 Parámetros de un disipador

Las estructuras cuentan con diversos parámetros o puntos de información que facilita conocer su comportamiento ante un evento al azar, ya sea por intervención humana o de la naturaleza y, teniendo un buen manejo de estos datos es posible aplicar cambios que mejoren la respuesta ante dichos eventos. Así como las estructuras, los disipadores cuentan con parámetros específicos para satisfacer una necesidad estructural, ya sea otorgarle mayor capacidad de carga a un elemento, aumentar o reducir su momento, o brindarle una liberación en un eje para evitar el colapso, entre otros.

Los disipadores, dependiendo de cuál se trabaje, cuentan con características únicas para cada tipo, pero todos comparten los mismos parámetros principales, esto facilita el proceso de selección para sus usos en situaciones específicas.

3.5.1 Desplazamiento máximo

La estabilidad que ofrece a la estructura, incluyendo la propia del disipador, es afectada directamente por este parámetro. El desplazamiento máximo altera la estabilidad de las cargas verticales, por lo que la estructura puede llegar a colapsar si el desplazamiento que ofrece el disipador supera los límites establecidos para la estructura, hasta el punto de llevarla a entrar en armonía con el evento sísmico.

El desplazamiento máximo (DM) en su dirección horizontal más crítica se puede calcular con la siguiente fórmula:

$$DM = \left[\frac{g}{4\pi^2} \right] \frac{S_{M1} T_M}{B_{M1}} \rightarrow Ec. 1$$

$$T_M = 2\pi \sqrt{\frac{W}{K_{Mmin}g}} \rightarrow Ec. 2$$

El T_M , o periodo efectivo del desplazamiento máximo puede ser determinado gracias a las características de deformación del aislador y usando la fórmula anterior. Es importante tener en cuenta también el desplazamiento total diseñado

(DTD) y el desplazamiento total máximo (DTM), para ello se usan las siguientes formulas:

$$D_{TD} = D_D \left[1 + y \frac{12e}{b^2 + d^2} \right] \rightarrow Ec. 3$$

$$D_{TM} = D_M \left[q + y \frac{12e}{b^2 + d^2} \right] \rightarrow Ec. 4$$

3.5.2 Rigidez efectiva

Hace referencia a la rigidez del cuerpo aislador de cada sistema, lo que indica que a mayor rigidez menor capacidad elástica del disipador. Este parámetro (k_{eff}) se determina gracias a los datos de fuerza y deflexión, a su vez con estos datos también es posible determinar el amortiguamiento efectivo (β_{eff}).

$$k_{eff} = \frac{|F^+| + |F^-|}{|D^+| + |D^-|} \rightarrow Ec. 5$$

$$\beta_{eff} = \frac{2}{\pi} \left[\frac{E_{Loop}}{k_{eff}(|D^+| + |D^-|)^2} \right] \rightarrow Ec. 6$$

3.6 Energía disipada por ciclo (EDC)

Un punto de suma importancia para los disipadores es su capacidad de, como su nombre lo indica, disipar la energía adicional que gana el edificio al ser sometido por una fuerza sísmica, la cual es la responsable de la destrucción y posteriores muertes por desplome de edificios. Un disipador es más eficaz en cuanto más energía disipe por ciclo sin alterar sus propiedades o las del edificio, claro está que es recomendable la alteración del disipador reemplazable que las secciones de la estructura.

Para poder determinar la energía disipada por ciclo, es necesario analizar la siguiente figura de la histéresis por ciclo, aclarando que la histéresis es la propiedad de un elemento de regresar a su estado inicial previo a una alteración por parte de una energía o medio externo, y por ciclo hablamos de cada sección de tiempo en que el disipador es afectado por la energía en este caso sísmica:

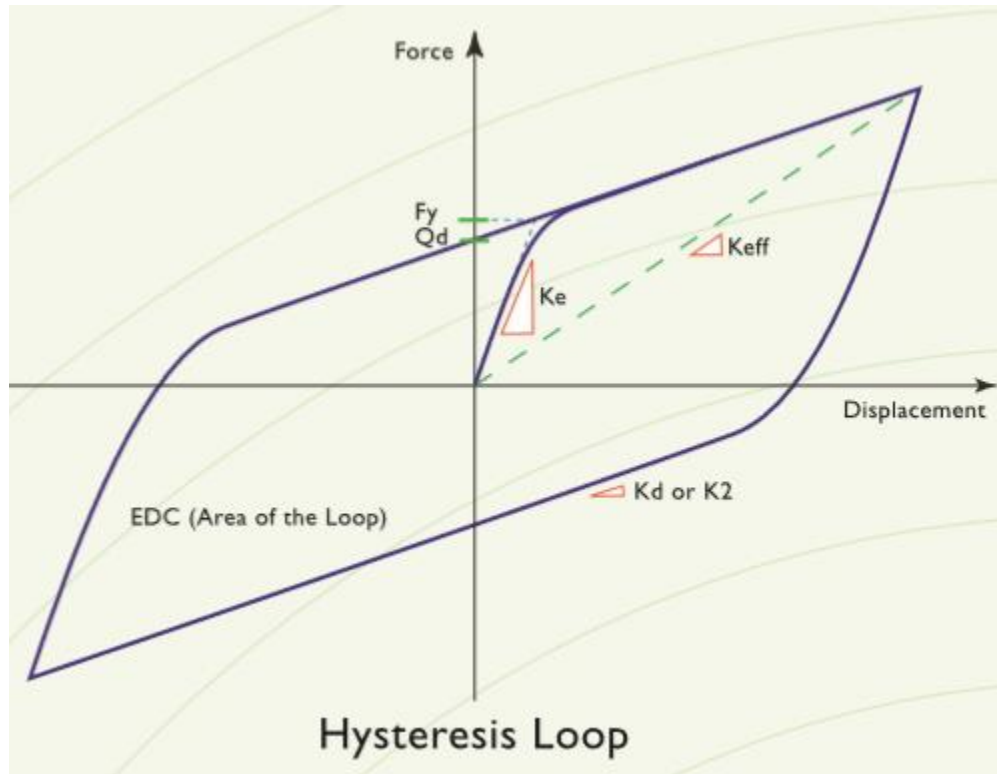


Fig. 15 Histéresis por ciclo, (Dynamic Isolation System, 2007)

$$Dy = \frac{Qd}{Ke - Kd} \rightarrow Ec. 7$$

La figura 15 muestra el esquema típico del diagrama esfuerzo-deformación de un sistema de aislamiento sísmico tipo neopreno. Es fácil ver que el material tiene un comportamiento no lineal y que posee diferentes valores de rigidez cuando está sometido a tensión o a compresión, cualidades típicas de los materiales con comportamiento bilineal. Esta curva se caracteriza de los aisladores de neopreno, y permite caracterizar la capacidad de disipar energía (amortiguamiento), la cual se calcula como el área encerrada por el ciclo de histéresis, comúnmente conocida como EDC (Energía Disipada por Ciclo). Las características mecánicas del disipador (área, elasticidad, etc.) determinan la EDC del sistema aislador.

Algunos parámetros que son necesarios para determinar el área bajo la curva que representa el EDC son el paso (dx en la integral), rigidez efectiva (keff), fuerzas (F), la deformación por fluencia (Dy), además también son necesarias algunas características propias del disipador, es por ello que cada sistema tiene una gráfica diferente, ya que depende del material con que está hecho, dimensiones, etc., las cuales varían dependiendo de cada fabricante del mercado. La EDC depende de del desplazamiento máximo y la fuerza tanto positiva como negativa ejercida en cada ciclo.

4. Modelado

Mediante el uso de diferentes softwares especializados, los ingenieros hemos encontrado una forma de analizar las estructuras y su comportamiento ante distintas situaciones que, aunque no estén ocurriendo bien pueden llegar a suceder; este es el caso del estudio que se presenta a continuación, con el fin de identificar la utilidad que tienen algunos disipadores de energía dinámica más utilizados en el campo de la construcción actual.

Aunque la tecnología es muy práctica, aún necesita cierta intervención humana, en el caso del SAP2000 es necesario asignarle los distintos atributos tanto a las secciones de la estructura modelada, como a los disipadores en sí, esto se lleva a cabo para tener unos datos más acordes a las necesidades de la entidad contratante o la interventoría.

En el siguiente modelo se analizó el sismo en dirección “Y”, y por ello es solo de interés la reacción que tiene el sistema en esta dirección.

4.1 Atributos de la estructura

La estructura diseñada para el estudio de disipadores consta de 3 (tres) niveles de 3 metros de entrepiso, los cuales cada uno es sostenido por una serie de 16 (dieciséis) columnas distribuidas equitativamente en cada dirección, formando un prisma cuadrado a partir de 4 columnas vistas desde el eje “X” y otras 4 (cuatro) vistas desde el eje “Y”; también se identifican un total de 24 (veinticuatro) vigas por piso, distribuidas equitativamente de la siguiente manera, 12 (doce) en el eje “X” y 12 (doce) en el eje “Y”, como se muestra en la siguiente figura:

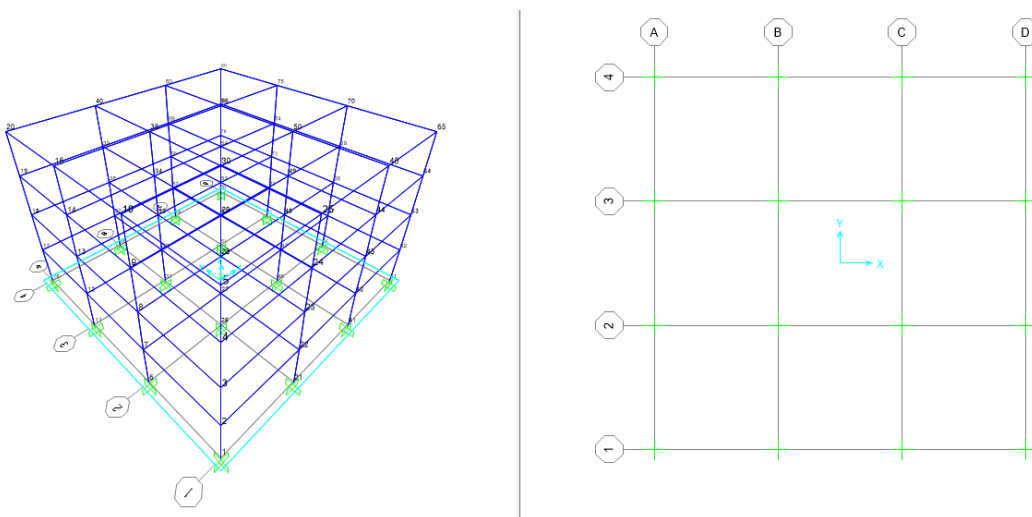


Fig. 16 Representación del modelo utilizado.

4.1.1 Columnas

Las columnas son de concreto reforzado con acero, que cumplen las siguientes características:

- Sección rectangular de 0,7 x 0,5 metros.
- Concreto de 4000 psi.
- Refuerzo de acero #9, con distribución 3x3.
- Estribos de acero #4, con 0,15 metros de separación.

4.1.2 Vigas

Las vigas son de concreto y cumplen las siguientes características:

- Sección rectangular de 0,5 x 0,3 metros.
- Concreto de 4000 psi.

4.2 Paso a paso del modelado

Modelado de un Rubber Isolator

El elemento Rubber Isolator de SAP200 incorpora comportamiento bilineal para las deformaciones por cortante, mientras que los demás tipos de deformaciones son consideradas lineales. Este tipo de modelo referencia dos documentos de Y. K. Wen (1976, 1986) los cuales establecen los parámetros mecánicos para este tipo de formulación (Computers & Structures Inc., 2011). De manera breve, los parámetros que se deben especificar para generar el elemento Rubber Isolator son:

- a. Selección de la dirección en que actúa el aislador (u1, u2, u3).
- b. Definición de la EDC (características del aislador).
- c. Definición del Rubber Isolator (Fig.17)

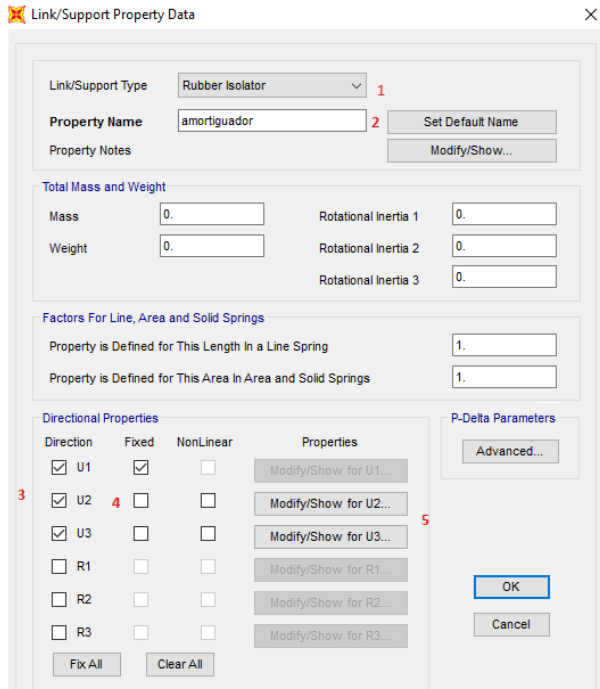


Fig. 17 Definición de Rubber Isolator

1. Se escoge el tipo de disipador a utilizar que en este caso es Rubber Isolator.
2. Se da el nombre del disipador.
3. Se seleccionan las tres direcciones.
4. Se deja una fija y las otras dos sin seleccionar.
5. Se modifican las propiedades de cada dirección.

d. Definición de las propiedades del Rubber Isolator (rigidez, coeficiente de amortiguamiento) (Fig.18).

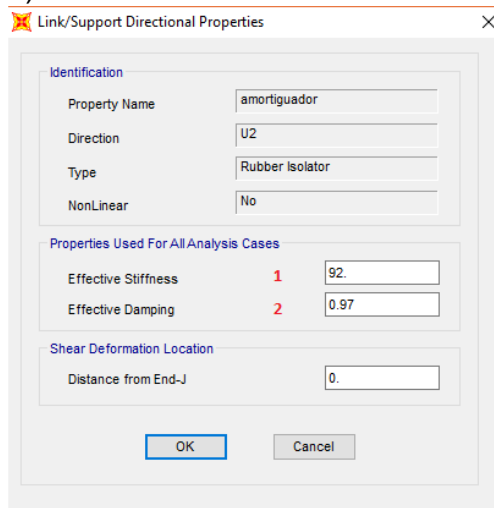


Fig. 18 Definición de propiedades del Rubber Isolator

1. Rigidez efectiva.
 2. Coeficiente de amortiguamiento.
- e. Dibujar los puntos en cada uno de los nodos (Fig.19 – Fig.20).

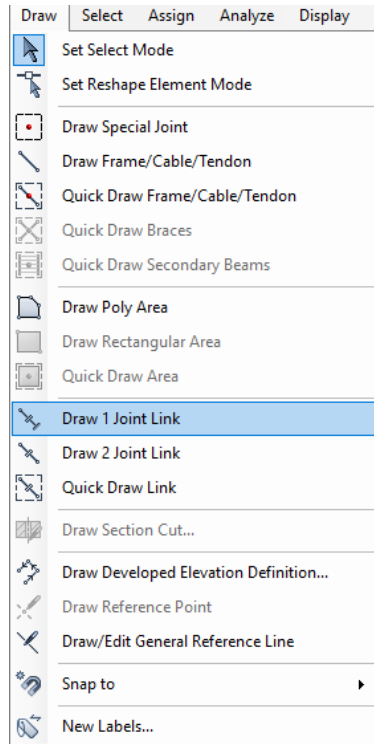


Fig. 19 Opción para dibujar el Rubber Isolator

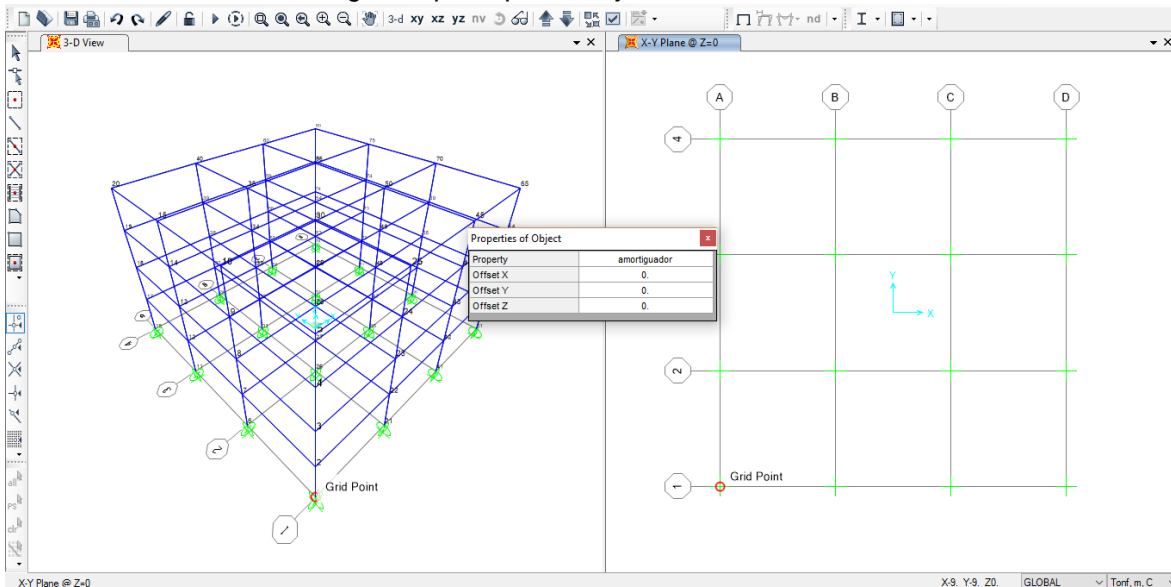


Fig. 20 Selección y visualización de nodos

Finalmente se corre el programa y se obtienen los resultados necesarios.

Para el problema analizado en este documento, se toma un aislador del archivo Dynamic Isolator Systems con las siguientes características (la tabla 1 y 2 presentan los parámetros y propiedades respectivamente del aislador):

Parámetros del Aislador	
Diámetro(mm)	355
Altura(mm)	150-305
# de capas	5-16
Diámetro del núcleo de plomo(mm)	0-100
Rigidez en Fluencia(KN/mm)	0.2-1.2
Rigidez a compresión(KN/mm)	>100
Desplazamiento máximo (mm)	150
Capacidad axial(KN)	700
Módulo de cortante(N/mm ²)	0.38-0.7

Tabla 1 Parámetros del aislador (Dynamic Isolation System)

Propiedades del Disipador (según especificaciones promedio)					Unidades	Ecuación
Diámetro	Di	355	mm	0,355	m	
Altura	H	228	mm	0,228	m	
# Capas	N	11	capas	11	capas	
Diámetro Núcleo de Plomo	DL	50	mm	0,05	m	
Área disipador	Ar	98979,8	mm ²	0,099	m ²	
Rigidez en fluencia	Kd	0,70	KN/mm	71,356	Ton/m	
Resistencia Característica	Qd	32,50	KN	3,3129	Ton	
Rigidez a compresión	Kv	100	KN/mm	10194	Ton/m	
Desplazamiento Máximo	D _{max}	150	mm	0,15	m	
Capacidad axial	P _{max}	700	KN	71,356	Ton	
Módulo de cortante	G	0,54	N/mm ²	55,068	Ton/m ²	
Rigidez elástica: Ke = 10*Kd	Ke	7,0	KN/mm	713,56	Ton/m	
Rigidez efectiva	Keff	0,92	KN/mm	93,442	Ton/m	Ec.5
Parámetros adicionales						
Paso	dx	1	mm	0,001	m	
Deformación fluencia	Dy	5,16	mm	0,005	m	Ec.7
Tensión máxima	Fmax+	137,5	KN	14,016	Ton	
Def. Max en compresión (suposición)	D _{max}	-150	mm	-0,15	m	
Energía Disipada por ciclo						
Energía Disipada por ciclo	EDC	125748	KN*mm	12,818	Ton*m	
Coeficiente de amortiguamiento eq.	Ceq	0,9703	sin unidades	0,970		Ec.6

Tabla 2 Propiedades del disipador

5. Análisis de resultados

Gracias al modelo estructural implementado y al software utilizado, se logró aplicar un esfuerzo dinámico definido de un sismo de magnitud 7.1 aplicado en sentido del eje “Y”, dicho esfuerzo dinámico fue aplicado de acuerdo a una duración de 60 segundos, donde cada segundo fue denominado “paso” en el software y hace referencia a los puntos de estudio de comportamiento estructural ante el sismo aplicado. Para un estudio eficaz, es utilizado una información de control, en este caso la respuesta dinámica de la estructura sin disipadores, luego se aplica la misma fuerza dinámica o sismo para la estructura con dos diferentes disipadores, disipador viscoso y disipador de bases en neopreno.

Las respuestas dinámicas monitoreadas durante el estudio fue el momento, la cortante, la deriva y el desplazamiento de un punto específico de la estructura o nodo estructural, que se ubicaba en la parte superior del modelo, esto en base a que los nodos superiores reciben mayor impacto por los eventos de este tipo.

El sismo utilizado en este modelo ocurrió en 1940 en “El centro” al sur de California (EEUU), donde murieron nueve personas y el 80% de las estructuras fueron dañadas hasta cierto punto. También causó daños en Brawley, donde el 50% de las estructuras se vieron afectadas. (Vibration Data, S.f)

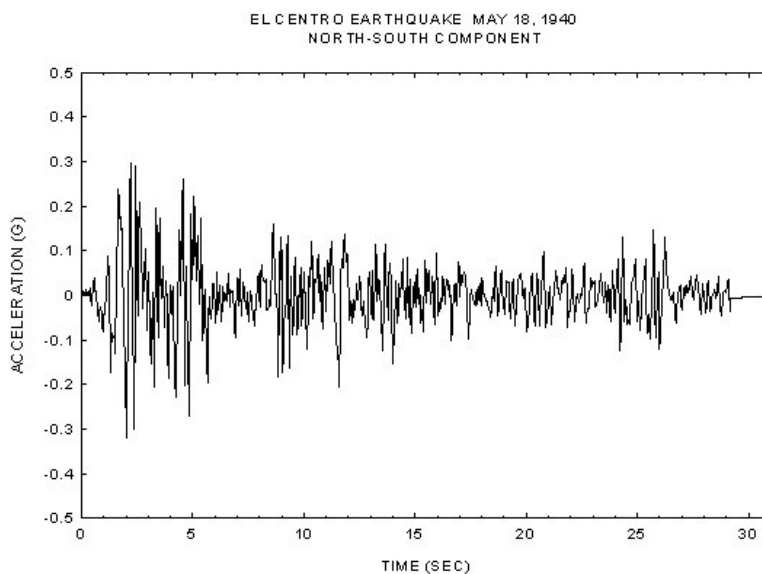


Fig. 21 Sismo aplicado al modelo (Vibration Data, S.f)

La diferente respuesta dinámica de la estructura se ve reflejada en las gráficas presentadas a continuación, donde el disipador #1 hace referencia a un disipador visco elástico, y el disipador #2 muestra el comportamiento de un disipador base de neopreno:

5.1 Cortante:

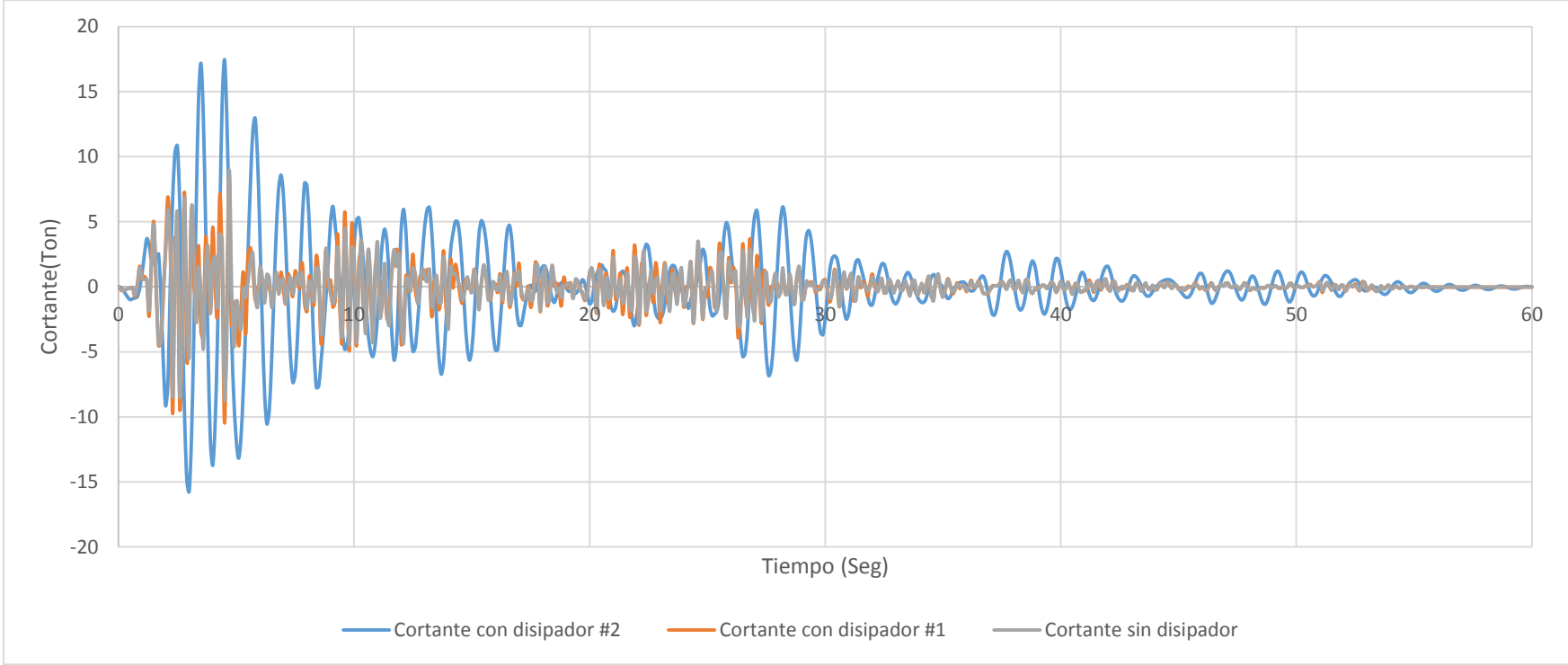


Fig. 22 Comparación del comportamiento de la cortante en el modelo control y con disipador #1 y #2

5.2 Momento:

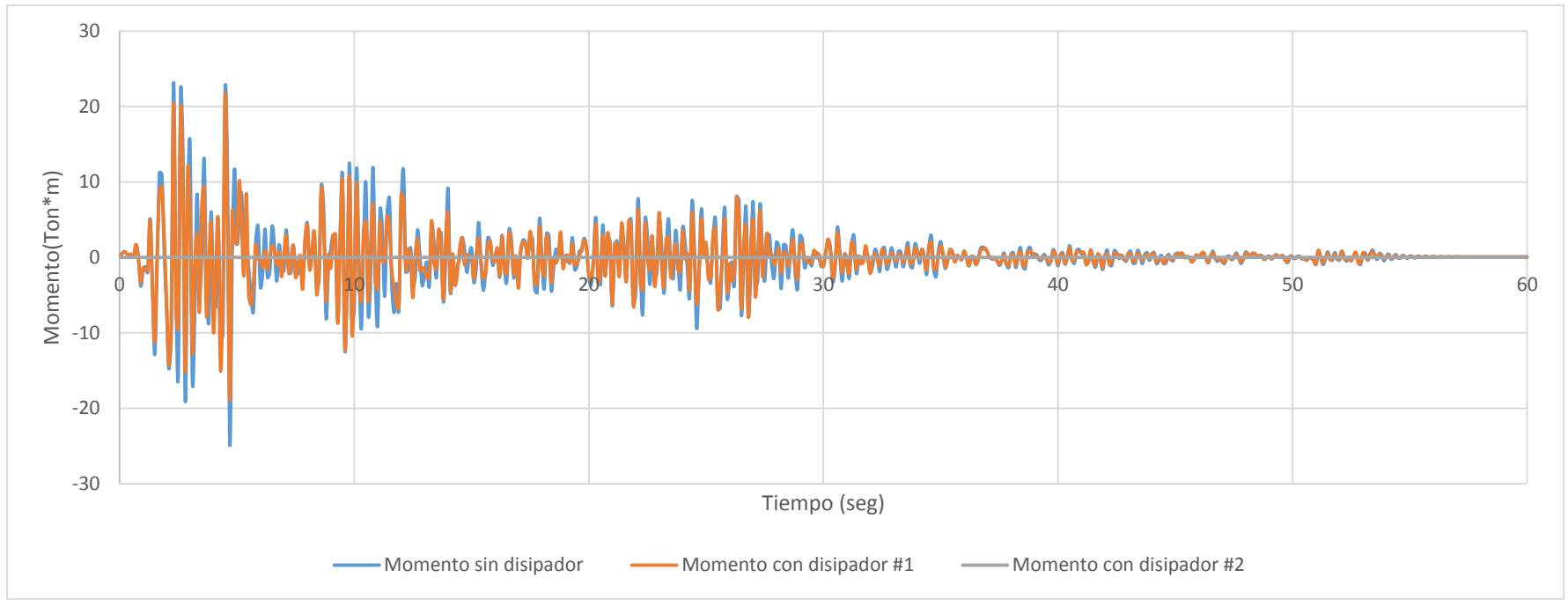


Fig. 23 Comparación de momentos entre el modelo de control y con disipador #1 y #2

5.3 Derivas:

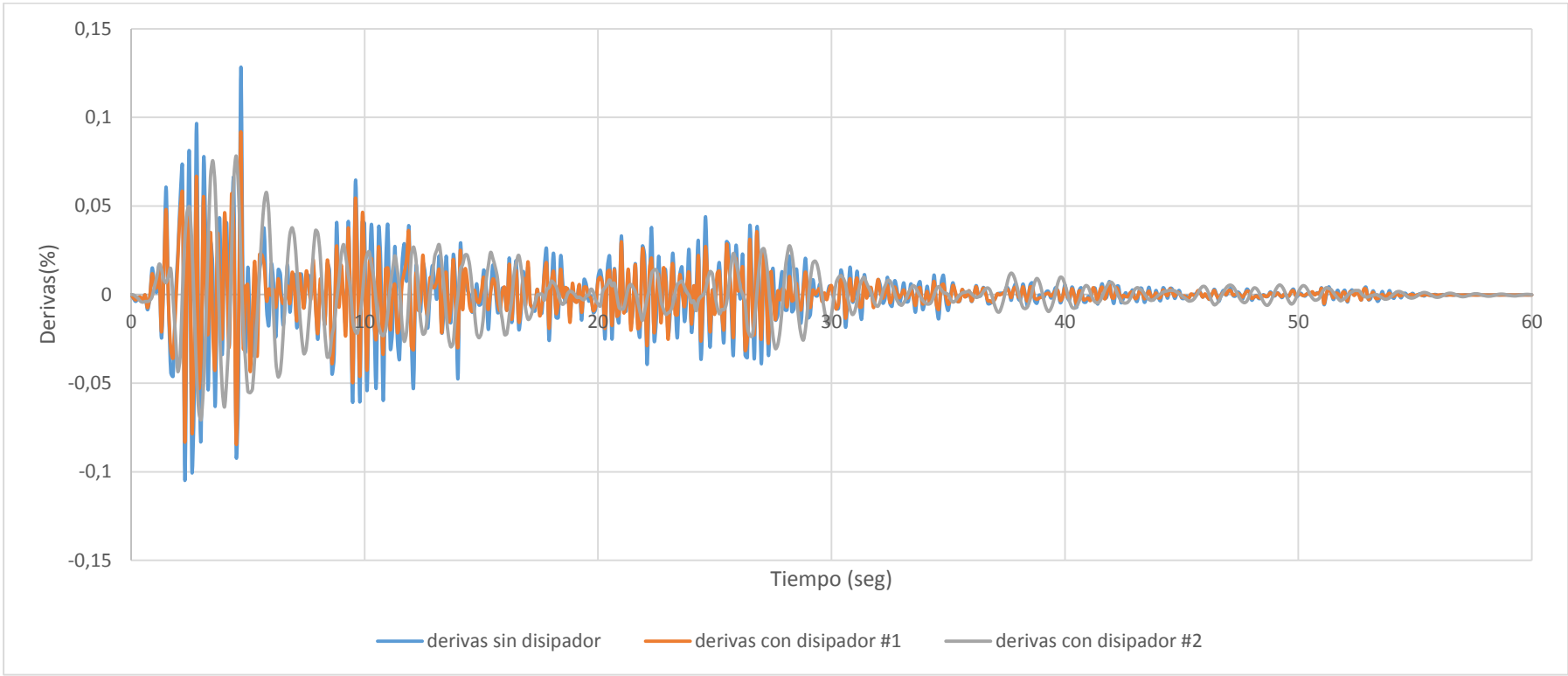


Fig. 24 Comparación de las derivas entre el modelo de control y el disipador #1 y #2

5.4 Desplazamiento:

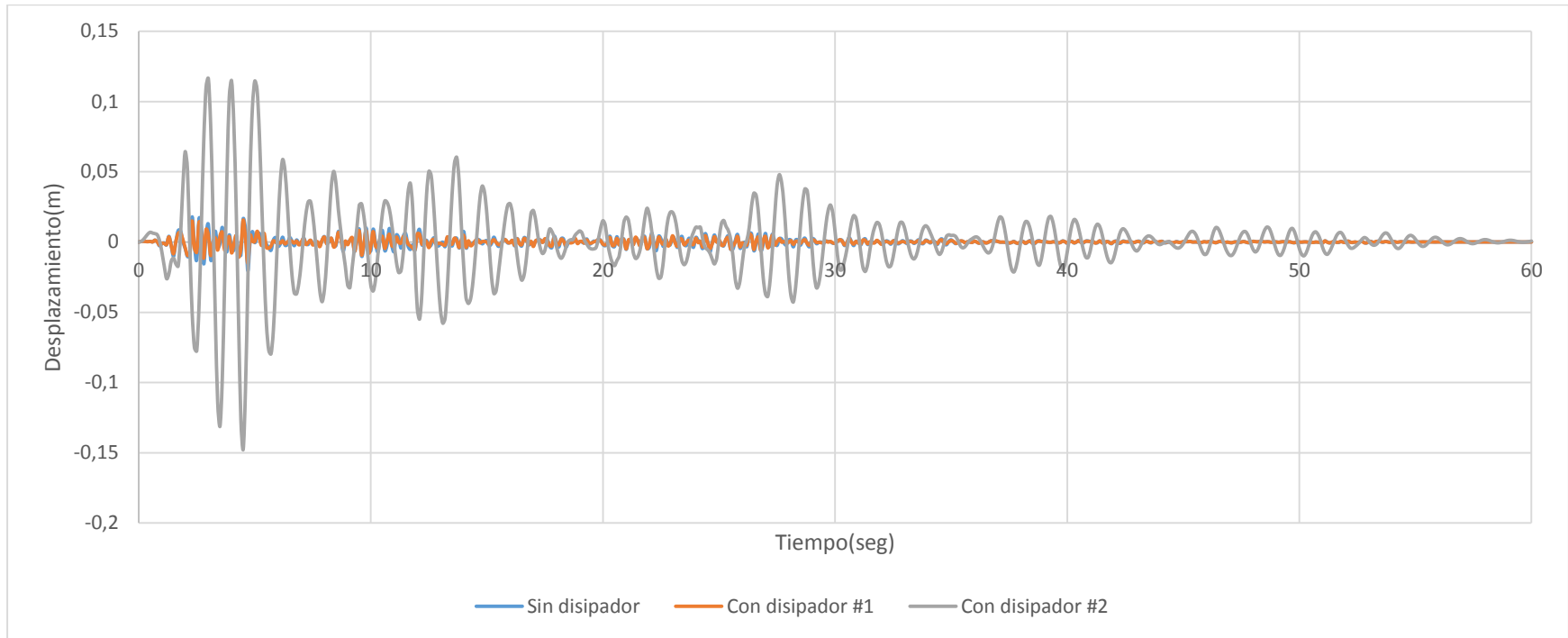


Fig. 25 Comparación de desplazamiento entre el modelo de control y con disipador #1 y #2

En la figura 22 (Cortante) es notable la similitud en la respuesta entre la cortante del modelo sin disipador y la cortante del modelo con disipador #1 (visco elástico), mientras que la respuesta con el disipador #2 (neopreno) es bastante diferente a las dos anteriores mostrando un aumento considerable en varios puntos de la gráfica. El estudio se realizó en el nodo #1 (base).

Cortante sin disipador			Cortante con disipador #1			Cortante con disipador #2		
Max	8,920	Ton	Max	8,641	Ton	Max	17,445	Ton
Min	-8,599	Ton	Min	-10,461	Ton	Min	-15,736	Ton

Tabla 3 Comparación de cortantes

En la figura 23 (momento), gracias al uso del disipador #1 se vio reducido el momento comparado con el modelo si disipador, mientras que el disipador #2 logro eliminar por completo el momento en la estructura. Estudio en el nodo #1 (base).

Momento sin disipador			Momento con disipador #1			Momento con disipador #2		
Max	23,104	Ton*m	Max	21,654	Ton*m	Max	0	Ton*m
Min	-24,809	Ton*m	Min	-18,983	Ton*m	Min	0	Ton*m

Tabla 4 Comparación de momentos

En la figura 24 (derivadas), aunque se presenta similitud entre la deriva de los modelos sin disipador y con disipador #1, se puede concluir que el segundo genero una reducción apropiada en el comportamiento porcentual de esta característica; el disipador en base de neopreno (#2) logro reducir la deriva con mayor eficacia en algunos puntos, pero en otros sucedió lo contrario, obteniendo resultados mayores a los de control. Estudio entre el segundo y tercer piso (nodos 64-65)

Derivas sin disipador			Derivas con disipador #1			Derivas con disipador #2		
Max	1,28	%	Max	0,92	%	Max	0,78	%
Min	-1,04	%	Min	-0,84	%	Min	-0,71	%

Tabla 5 Comparación de derivas

En la figura 25, el desplazamiento es bastante mayor mediante el uso del disipador #2 pues le genera puntos de desplazamiento libre al edificio, con el fin de reducir el impacto por los sismos a las partes estructurales fijas, por esto es considerablemente mayor el desplazamiento con este disipador en comparación con el control o el disipador #1. Estudio en el nodo superior #80.

Sin disipador			Con disipador #1			Con disipador #2		
Max	0,018	m	Max	0,016	m	Max	0,116	M
Min	-0,020	m	Min	-0,015	m	Min	-0,148	M

Tabla 6 Comparación de desplazamientos

6. Conclusiones

- El uso de disipador visco elástico proporciona una reducción en las afecciones que pueda sufrir una estructura por sismos de magnitud media, ya que el análisis de resultados demuestra que, aunque son similares a los datos de control, utilizando este disipador se reducen los valores de las características en un mínimo del 20% (Castro, 2016).
- Los disipadores en base de neopreno son un elemento bastante útil al momento de combatir fuerzas sísmicas, evidenciando una nulidad en los momentos que sufre la estructura a cambio de un mayor desplazamiento (controlado y que no afecta las coyunturas de la estructura).
- La deriva es un atributo importante a tener en cuenta ya que consiste en el desplazamiento entrepisos para cada nivel, y gracias al uso de disipadores de energía, en especial el aislador de base, esta característica baja considerablemente.
- Al estudiar un punto de base de la estructura con bases de neopreno el momento es cero (0), y la cortante en dicho punto aumenta considerablemente, ya que la estructura está casi separada.
- Utilizar disipadores de tipo diagonal, como es el caso del disipador visco elástico (número 1 en el estudio), le agrega rigidez a la estructura, por lo que soporta mayor fuerza cortante en sus elementos.

7. Recomendaciones

- Es necesario implementar construcciones sismo resistentes en cualquier ubicación, aunque no se encuentre cerca a fallas geológicas, ya que el suelo de estas localizaciones permite un mejor paso de energía y por consecuente un impacto mayor a las estructuras.
- El uso de disipadores requiere un análisis correcto para que su utilidad justifique el costo de su uso, debe haber un balance entre su capacidad de amortiguamiento, el valor de la instalación y el mantenimiento.
- Se deben realizar estudios del tipo de obra, ubicación, clima, entre otros aspectos, para lograr seleccionar un disipador que cumpla un buen desempeño y que no se vea afectado por las condiciones nombradas.

Bibliografía

- A. B., M. A., & A. B. (2010). *Seismic performance of a multi-span bridge fitted with superelastic SMA based isolator*.
- Aiken, I., Nims, D., Whittaker, A., & Kelly, J. (1993). Testing of passive energy dissipations systems. *Earthquake Spectra Magazine*.
- Anónimo. (27 de Noviembre de 2012). *Prezi*. Obtenido de <https://prezi.com/am4cbnxxdik7/disipadores-de-energia/>
- Bernaola, D. (2011). Construcciones antisísmicas y genética agraria con 5000 años de historia. *Ciudad y territorio*.
- Burgos. (s.f.). *Disipadores de energía fluido viscoso*. Obtenido de <http://mabieperu.com/publicaciones/publicacion04.pdf>
- California, U. o. (s.f.). Obtenido de <http://www.cts.usc.edu/educationfellowships-surgerytraining-facilities-uscuh.html>
- Castro, G. V. (7 de Julio de 2016). *Youtube*. Obtenido de <https://www.youtube.com/watch?v=8C2yXF06fsl>
- (s.f.). Chapter 9: Seismic Isolation and Energy Dissipation (Systematic Rehabilitation). En *Seismic Rehabilitation Guidelines*. FEMA.
- Choquepoma, J., & Beremiz, M. (8 de Julio de 2015). Disipadores de energía.
- Choquepoma, J., & Beremiz, M. (8 de Julio de 2015). *SlideShare*. Obtenido de <http://es.slideshare.net/berzmonkey/disipadores-de-energia-51179598>
- Computers & Structures Inc. (2011). *CSI Analysis Reference Manual for SAP2000, ETABS, SAFE and CSiBridge*. Berkeley, Cal.
- Constantinou, M., Song, T., & Dargush, G. (1998). *Passive energy dissipation systems for structural design and retrofit*. New York.
- Corporación de desarrollo tecnológica CDT. (2012). Sistemas de aislación sísmica y disipación de energía. *One Touch EMB Construcción*.
- D. S. (2009). *Equivalent Viscous Damping*.
- de la Llera, J. C. (12 de Julio de 2010). *SlideShare*. Obtenido de <http://es.slideshare.net/laraditzel/2010-07-10-juan-carlos-de-la-llera>
- Delucchi, H. (2010). Estructuras sismoresistentes. *One Touch EMB Construcción*.
- Dynamic Isolation System*. (s.f.). Obtenido de <http://www.dis-inc.com/technical.html>
- Dynamic Isolation System. (2007). Seismic Isolation For Buildings and Bridges. En *Seismic Isolation For Buildings and Bridges*.

- Gómez, D., Marulanda, J., & Thomson, P. (2008). *Sistemas de control para la protección de estructuras civiles sometidas a cargas dinámicas*. Cali: Dyna.
- Hoffman. (2013). *Blogspot*. Obtenido de <http://byron-hoffmann.blogspot.com.co/>
- Laborbedarf Bochem. (S.f.). *Laborbedarf Bochem Lab Supply*. Obtenido de <http://www.bochem.com/es/Informaci%C3%B3n+%C3%BAtil/Viscosidad.html>
- Martínez, & Sánchez. (2004). *Análisis sísmico de tanques elevados sobre diferentes sistemas estructurales de hormigón reforzado en la ciudad de Bucaramanga*. Bucaramanga.
- Nelson. (31 de Mayo de 2012). *Blogspot*. Obtenido de Construcción en Chile: <http://nlsn770.blogspot.com.co/>
- Oviedo, J. A., & Duque, M. d. (2009). Disipadores histeréticos metálicos como técnica de control de respuesta sísmica en edificaciones colombianas. *EIA*.
- Pardo Galvis, D. (2008). *Disipadores de energía tipo adas para diseño sísmico de estructuras*. Bogotá.
- Peña Mondragón, F., & Lourenço, P. (2012). Criterios para refuerzos antisísmicos de estructuras históricas. *Ingeniería sísmica*.
- Pimiento, J., Salas, A., & Ruiz, D. (2014). Desempeño sísmico de un pórtico con disipadores de energía pasivos de placas ranuradas de acero. *Ingeniería de construcción*.
- Pinzón Mayorga, N., & Martínez López, E. (2014). *Estado del arte y modelo didáctico - Descriptivo de amortiguadores y aisladores sísmicos*. Bogotá.
- ScienceDirect. (2006). Performance of passive energy dissipation systems during near-field ground type pulses. *Elsevier*.
- SIGWeb. (8 de Julio de 2015). Disipadores de energía. Obtenido de <http://www.sigweb.cl/biblioteca/DisipacionEnergia.pdf>
- Silverio, M. (2011). *CivilGeeks*. Obtenido de <http://civilgeeks.com/2011/08/29/sistemas-de-proteccion-sismica/>
- Torres, M. (2009). Sistemas de disipación pasiva de energía sísmica. *Construcción y tecnología en concreto*.
- Universidad de Morón. (1 de Abril de 2014). *Tia Uno*. Obtenido de http://tiaestructurasunonoche.blogspot.com.co/2012/04/blog-post_9355.html
- Vargas Bello, P. (s.f.). *Ingeniería Civil en Obras Civiles PVB*. Obtenido de <https://ingcivilocpvb.wordpress.com/tag/titanium/>
- Vibration Data. (S.f.). *Vibration Data El Centro Earthquake*. Obtenido de <http://www.vibrationdata.com/elcentro.htm>
- Villa García, L. M. (2009). Algunas consideraciones sobre la futura instrucción de acero estructural EAE en lo referente al proyecto de estructuras sismoresistentes. *Dyna*.

Villareal Castro, G., & Oviedo Sarmiento, R. (2009). *Edificaciones con disipadores de energía*. Lima.

Villareal, G. (s.f.). *Archivos Uni*. Obtenido de

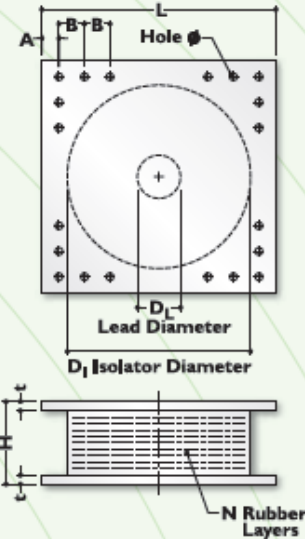
<http://informesuniversitariospdf.blogspot.com.co/2014/08/disipadores-de-energia.html>

Youtube. (s.f.). Obtenido de <https://www.youtube.com/watch?v=ufbFG9e4yjU>

Anexos

DEVICE SIZE				MOUNTING PLATE DIMENSIONS					
Isolator Diameter, D_I (mm)	Isolator Height, H (mm)	Number of Rubber Layers, N	Lead Diameter D_L (mm)	L (mm)	t (mm)	Hole Qty.	Hole ϕ (mm)	A (mm)	B (mm)
305	125-280	4-14	0-100	355	25	4	27	50	-
355	150-305	5-16	0-100	405	25	4	27	50	-
405	175-330	6-20	0-125	455	25	4	27	50	-
455	175-355	6-20	0-125	510	25	4	27	50	-
520	205-380	8-24	0-180	570	25	8	27	50	50
570	205-380	8-24	0-180	620	25	8	27	50	50
650	205-380	8-24	0-205	700	32	8	27	50	50
700	205-430	8-30	0-205	750	32	8	33	65	75
750	230-455	8-30	0-230	800	32	8	33	65	75
800	230-510	8-33	0-230	850	32	8	33	65	75
850	230-535	8-35	0-255	900	38	12	33	65	95
900	255-560	9-37	0-255	955	38	12	33	65	95
950	255-585	10-40	0-280	1005	38	12	33	65	95
1000	280-635	11-40	0-280	1055	38	12	40	75	115
1050	305-660	12-45	0-305	1105	44	12	40	75	115
1160	330-760	14-45	0-330	1205	44	12	40	75	115
1260	355-760	16-45	0-355	1335	44	16	40	75	115
1360	405-760	18-45	0-380	1435	51	16	40	75	115
1450	430-760	20-45	0-405	1525	51	20	40	75	115
1550	455-760	22-45	0-405	1625	51	20	40	75	115

Isolator Diameter, D_I (mm)	DESIGN PROPERTIES			Maximum Displacement, D_{max} (mm)	Axial Load Capacity P_{max} (kN)
	Yielded Stiffness, K_e (kN/mm)	Characteristic Strength Q_d (kN)	Compression Stiffness, K_c (kN/mm)		
305	0.2-0.9	0-65	>50	150	450
355	0.2-1.2	0-65	>100	150	700
405	0.3-1.6	0-110	>100	200	900
455	0.3-2.0	0-110	>100	250	1,150
520	0.4-2.3	0-180	>200	300	1,350
570	0.5-2.8	0-180	>500	360	1,800
650	0.5-3.5	0-220	>700	410	2,700
700	0.5-4.2	0-220	>800	460	3,100
750	0.7-4.7	0-265	>900	460	3,600
800	0.7-5.3	0-265	>1,000	510	4,000
850	0.7-6.1	0-355	>1,200	560	4,900
900	0.7-6.1	0-355	>1,400	560	5,800
950	0.7-6.1	0-490	>1,800	610	6,700
1000	0.8-6.3	0-490	>1,900	660	7,600
1050	0.9-6.3	0-580	>2,100	710	8,500
1160	1.1-6.5	0-665	>2,800	760	13,800
1260	1.2-6.7	0-755	>3,700	810	20,500
1360	1.4-7.0	0-890	>5,100	860	27,600
1450	1.6-7.2	0-1,025	>5,300	910	33,400
1550	1.8-7.4	0-1,025	>6,500	910	40,000



- (1) The axial load capacities correspond to maximum displacements based on design limits of 250% rubber shear strain or 2/3 the isolator diameter. An isolator's actual displacement and load capacity are dependent on the rubber modulus and number of rubber layers.
- (2) Rubber Shear Moduli (G) are available from 0.38 N/mm² to 0.70 N/mm².
- (3) For analytical bilinear modeling of the Elastic Stiffness use $K_e=10 \cdot K_d$.

Fig. 26 Catalogo comercial de DIS (Dynamic Isolation System)