

Universidad del Valle De Guatemala

Facultad de Ingeniería



Excelencia que trasciende

DELVALLE
GRUPO EDUCATIVO

Megaproyecto

**APLICACIÓN DE SISTEMAS TECNÓLOGICOS
ENFOCADOS AL DISEÑO ESTRUCTURAL**

TOMO III

Subtema

**AMORTIGUADORES PASIVOS PARA LA REDUCCIÓN DE
VIBRACIONES EN EDIFICIOS DE MEDIANA ALTURA**

Trabajo de graduación presentado por Álvaro José Córdova Guirola, Luis Alfonso Martínez Natareno, Marlon Estuardo Marroquín Silva y César Alejandro de León Orellana para optar al grado académico del Licenciados en Ingeniería Civil.

Guatemala

2012

Megaproyecto

**APLICACIÓN DE SISTEMAS TECNOLÓGICOS ENFOCADOS AL
DISEÑO ESTRUCTURAL**

Subtema

**AMORTIGUADORES PASIVOS PARA LA REDUCCIÓN
DE VIBRACIONES EN EDIFICIOS DE MEDIANA ALTURA**

Universidad del Valle De Guatemala

Facultad de Ingeniería



Excelencia que trasciende

DELVALLE
GRUPO EDUCATIVO

Megaproyecto

**APLICACIÓN DE SISTEMAS TECNÓLOGICOS
ENFOCADOS AL DISEÑO ESTRUCTURAL**

TOMO III

Subtema

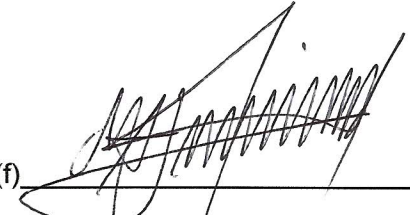
**AMORTIGUADORES PASIVOS PARA LA REDUCCIÓN DE
VIBRACIONES EN EDIFICIOS DE MEDIANA ALTURA**

Trabajo de graduación presentado por Álvaro José Córdova Guirola, Luis Alfonso Martínez Natareno, Marlon Estuardo Marroquín Silva y César Alejandro de León Orellana para optar al grado académico del Licenciados en Ingeniería Civil.

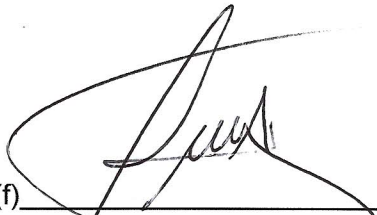
Guatemala

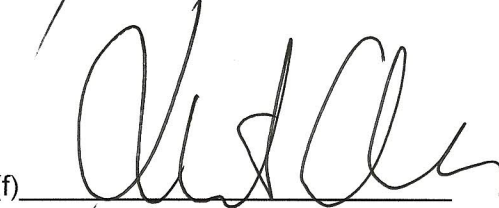
2012

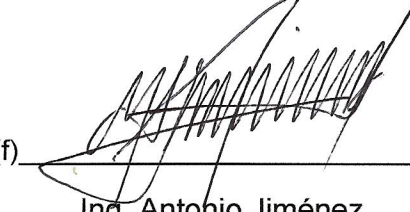
Vo.Bo.:

(f) 
Ing. Antonio Jiménez

Tribunal Examinador:

(f) 
Ing. Luis Díaz Coto

(f) 
Ing. Roberto Godo

(f) 
Ing. Antonio Jiménez

Fecha de aprobación: Guatemala, 8 de Noviembre 2012

PREFACIO

La Ingeniería Sismo resistente es una rama de la Ingeniería Civil que ha mostrado muchos retos para su análisis exacto. Actualmente existen programas, basados en investigación y experiencia, capaces de analizar el comportamiento de una estructura bajo cargas gravitacionales y laterales. Esto provee una valiosa herramienta al ingeniero para lograr optimizar al máximo el diseño sismo resistente. Guatemala, en promedio, muestra un índice de sismicidad bastante alto.

Por lo tanto este trabajo busca proveer una nueva solución al problema de vibraciones en edificios para Guatemala: amortiguadores pasivos. Se pretende contribuir a la propuesta de nuevas tendencias y métodos para enfrentar la amenaza sísmica tomando en cuenta los programas computacionales para lograr una mejor aproximación de la realidad.

Este trabajo se enfoca en una sola clase de estructura, sin embargo, puede ser explorado para edificios, casas, silos, estructuras metálicas etc. y observar los resultados. Es un tema que ha sido levemente explorado, en especial en Guatemala, y por lo tanto posee un amplio campo de investigación.

CONTENIDO

PREFACIO	vi
CONTENIDO	vii
LISTA DE CUADROS	ix
LISTA DE ILUSTRACIONES	x
RESUMEN	XIII
I. INTRODUCCIÓN	1
II. OBJETIVOS	2
A. Generales	2
B. Específicos	2
III. MARCO TEÓRICO.....	3
A. Sismología, sismicidad y tectónica de placas.....	3
1. Definiciones.....	3
2. Estructura interna del planeta Tierra:.....	3
3. Sismología	5
B. Dinámica estructural y sismo resistencia	20
1. Conceptos introductorios.....	20
2. Sistemas con un grado de libertad	26
C. Sistemas de control estructural	35
1. Introducción.....	35
2. Dispositivo de control pasivo.	35
3. Control activo.	52
4. Control híbrido y semi-activo.	53

IV. MARCO PRÁCTICO.....	55
A. Ejecución del edificio control.....	55
B. Sistema de Amortiguamiento de Líquido Sintonizado (ALS)	56
1. Etapas de diseño de los amortiguadores de líquido sintonizado.....	56
2. Cálculos y resultados..	59
C. Amortiguadores laterales	70
1. Etapas de análisis de los amortiguadores laterales	70
2. Cálculos y resultados.	71
Planta de ubicación de los amortiguadores Taylor	84
D. Sistema de aislación de base.....	86
1. Descripción de la metodología de análisis.....	86
3. Cálculos y resultados	88
E. Sistema de amortiguamiento de masa sintonizada	96
1. Procedimiento del análisis.....	96
2. Cálculos y resultados	97
V. DISCUSIÓN	107
1. Amortiguadores de líquido sintonizado.....	107
2. Amortiguadores laterales.....	109
3. Aisladores de base.....	111
4. Sistema de amortiguamiento de masa sintonizada.....	113
VI. CONCLUSIONES.....	117
VII. RECOMENDACIONES	122
VIII. BIBLIOGRAFÍA	126
IX. ANEXOS	132

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1: Magnitud vs daños colaterales en escala de Richter.....	16
Cuadro 2: Derivas sin el dispositivo, con carga sísmica.....	58
Cuadro 3: Derivas con el dispositivo, con carga sísmica.....	59
Cuadro 4: Derivas sin el dispositivo, con carga de viento.....	64
Cuadro 5: Con el dispositivo, con carga de viento.....	65

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Corteza Terrestre	4
Ilustración 2: Interior de la tierra	5
Ilustración 3: Terremoto, hipocentro y epicentro	6
Ilustración 4: Onda S	7
Ilustración 5: Onda Rayleigh.....	7
Ilustración 6: Onda Love.....	8
Ilustración 7: Ejemplificación de la onda Love	8
Ilustración 8: Pangea.....	9
Ilustración 9: Placas tectónicas	10
Ilustración 10: Subducción y cordillera de los Andes	11
Ilustración 11: Deslizamiento y falla de San Andrés	11
Ilustración 12: Divergencia	12
Ilustración 13: Clasificación de fallas	14
Ilustración 14: Sismógrafo	15
Ilustración 15: Sismograma	15
Ilustración 16: Escala de Richter	17
Ilustración 17: Escala de Mercalli	18
Ilustración 18: Amenazas sísmicas en Guatemala.....	19
Ilustración 19: Resumen de sismos en Guatemala (1908-1998).....	20
Ilustración 20: Esfuerzo-deformación para un material elástico	22
Ilustración 21: Esfuerzo-deformación para acero A992	22
Ilustración 22: Tabla de rigideces para vigas.....	23

Ilustración 23: Curva fuerza-deformación para material inelástico	25
Ilustración 24: Movimiento vs. Tiempo.....	25
Ilustración 25: Viga simplemente apoyada con una carga puntual en el centro	26
Ilustración 26: Ejemplificación de vibración libre no amortiguada	26
Ilustración 27: DCL para el sistema propuesto	27
Ilustración 28: Modelación de sistema de vibración no amortiguado	29
Ilustración 29: DCL para el mismo sistema.....	30
Ilustración 30: Curva de desplazamiento vs. Tiempo para un sistema críticamente amortiguado.....	31
Ilustración 31: Curva de desplazamiento vs. Tiempo para un sistema sub-amortiguado.....	32
Ilustración 32: DCL para una vibración forzada amortiguada.....	33
Ilustración 33: Curvas de amplificación vs razón de frecuencias para varios sistemas de amortiguación	34
Ilustración 34: Frecuencia de oscilación disminuida por un sistema de aislación de base.....	36
Ilustración 35: Vertical.	37
Ilustración 36: Desplazamiento y flexibilidad del plano horizontal.....	37
Ilustración 37: Disipación de energía.	37
Ilustración 38: Reposicionamiento de la estructura.	37
Ilustración 39: Estructura con un sistema de aislación de base y amortiguador.	38
Ilustración 40: respuesta del suelo con aisladores y sin aisladores de base.....	39
Ilustración 41: Diseño sismo resistente de construcciones de acero	40
Ilustración 42: Rehabilitación de un edificio de concreto con arriostramientos concéntricos.....	41
Ilustración 43: Marcos arriostrados excéntricamente	42

Ilustración 44: Placas de acero como muros de corte.....	43
Ilustración 45: Barras de pandeo restringido.....	43
Ilustración 46: Edificio Taipei 101	49
Ilustración 47: Ejemplificación de amortiguador de líquido de columna sintonizado.....	50
Ilustración 48: Hotel Cosima, Tokyo	51
Ilustración 49: Análisis computacional de sistemas de control pasivo de vibraciones	52
Ilustración 50: Amplitud del movimiento lateral	61
Ilustración 51: representación de la aceleración que recibe cada tanque	63
Ilustración 52: Asignación de resortes en Etabs.	64
Ilustración 53: Desplazamiento de los tanques vs. El edificio	67
Ilustración 54: Comparación de movimiento con y sin dispositivo.....	68
Ilustración 55: Fuerza de los dispositivos	69

RESUMEN

Este trabajo de graduación consta de una investigación sobre tres puntos; en primer lugar la sismología del país de Guatemala. Ésta estará centrada en las principales causas sísmicas de Guatemala y la región, haciendo énfasis en los diversos grados de sismicidad dentro del país. En segundo lugar, tendrá el desarrollo de los descubrimientos más recientes sobre la dinámica estructural exaltando el tema de la amortiguación y en particular el tipo de vibración que se genera cuando existe amortiguamiento (Vibración Libre Amortiguada). Luego, como tercer punto, se hará un recuento de los dispositivos de amortiguación, aislación y disipación de energía que existen y sus aplicaciones así como las clasificaciones en las que estos se encuentran (Ej.: amortiguadores pasivos, activos etc.).

Adicionalmente, este trabajo tendrá una parte práctica, en la cual se desarrollará el modelo de un edificio de concreto de 25 niveles en el programa Etabs, por CSI. Este será sometido a una carga de sismo y otra de viento, adicional a las cargas muerta y viva, y se le agregará la fuerza equivalente de amortiguamiento generada por el dispositivo sintonizado de agua. Se estudiarán los resultados comparándolos con los de los otros integrantes del presente proyecto de investigación, quienes harán la misma prueba al mismo edificio pero con los dispositivos de su investigación.

I. INTRODUCCIÓN

Este trabajo pretende demostrar la siguiente hipótesis: “tanto el sistema de amortiguamiento de líquido sintonizado (ALS), el sistema de masa sintonizado, amortiguadores laterales y los aisladores de base proveen una solución al problema de los desplazamientos laterales provocados por cargas laterales en un edificio de 25 niveles de marcos estructurales de concreto”.

El contexto del trabajo se ubica en Guatemala, Guatemala, para lo cual se utilizaron los parámetros de tipo de suelo y de índice de sismicidad para esta región para la obtención y calibración del sismo; datos proveídos por la Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica, AGIES. De igual forma para los parámetros de velocidad y presión de la carga de viento.

Todos los cálculos realizados posteriormente, parten de la teoría de movimiento libre amortiguado para modelar tanto el movimiento de la estructura como el de los dispositivos del amortiguador de líquido sintonizado.

En cuanto a la integración de la carga sísmica, se utiliza el método estático (AGIES) para calibrar el espectro sísmico del sismo dinámico. Se asume que la estructura posee cierta ductilidad y que, por lo tanto, la estructura y, por consiguiente, las derivas trabajarán en el rango post-elástico.

II. OBJETIVOS

A. Generales

- Presentar las bases teóricas que permitan la implementación de sistemas de control de vibraciones como dispositivos pasivos para encontrar soluciones viables en edificios de mediana altura en Guatemala, utilizando sistemas tecnológicos en el modelado estructural computacional como herramienta para el análisis.

B. Específicos

- Investigar los principios básicos del comportamiento dinámico estructural, y encontrar todos los parámetros de movimiento para la vibración libre amortiguada de la estructura.
- Realizar una investigación bibliográfica de los dispositivos para el control de vibraciones, que sean factibles para la implementación en el contexto guatemalteco.
- Llevar a cabo una investigación bibliográfica de las clases de dispositivos que combinen un sistema de riostras con amortiguadores laterales para entender su comportamiento y aplicarlo al contexto guatemalteco.
- Realizar una investigación bibliográfica de los amortiguadores de masa sintonizada para el control de vibraciones.
- Investigar los principios básicos del comportamiento dinámico estructural y sísmico de las estructuras y de los amortiguadores de masa sintonizada y que su aplicación sea factible dentro del contexto guatemalteco según estudios de campo y bibliográficos.
- Identificar un sistema de aislamiento de base como dispositivo para el control de vibraciones, aplicable al contexto guatemalteco con ayuda de un estudio teórico que proporcione información cuantitativa y que tome en cuenta los parámetros y

tendencias en el medio constructivo, socio económicos y tecnológicos que existen en el país.

- Reducir las vibraciones en un edificio de mediana altura a través de un sistema de amortiguamiento de líquido sintonizado.
- Reducir las vibraciones en un edificio de mediana altura a través de un sistema de amortiguamiento de líquido sintonizado y determinar cuáles son las limitantes del uso del mismo para saber cuáles son los escenarios de óptima eficiencia en este sistema de amortiguamiento.
- Comparar el efecto de diferentes dispositivos de amortiguamiento en un mismo edificio de 25 niveles.
- Realizar y calibrar un modelo virtual para analizar el comportamiento del dispositivo estudiado en una estructura.

III. MARCO TEÓRICO

A. Sismología, sismicidad y tectónica de placas

1. Definiciones

a. **Sismología:** La sismología es una de las ramas de la geofísica, la cual se dedica al estudio de las causas que dan origen a los sismos. Esto introduce al concepto de placas tectónicas y a la interacción entre ellas; esto será definido más adelante en el presente trabajo. (Sugac, V. 2012)

b. **Sismicidad:** Ésta es una rama de la sismología, dedicándose específicamente al estudio de las principales zonas de alta, mediana y baja vulnerabilidad sísmica del planeta. Asimismo del historial sísmico de dichas regiones.

c. **Tectónica de placas:** La tectónica de placas es literalmente una hipótesis que actualmente es considerada una teoría cierta sobre el origen de las placas, considerando un movimiento perpetuo de la tierra (rotación) y el movimiento consecuente del magma ubicado en el centro de la tierra. Esta teoría explica la interacción de las diversas placas existentes a lo largo de la litósfera (capa externa de la Tierra) y las consecuencias de dichas interacciones, tales como cadenas montañosas (orogénesis) y hot spots. Más adelante veremos al detalle este punto. (Sugac, V. 2012)

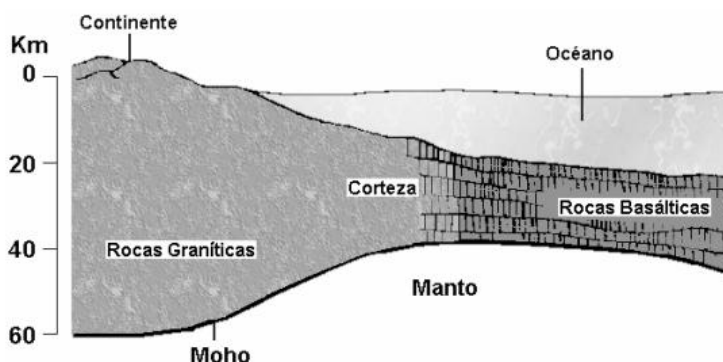
2. **Estructura interna del planeta Tierra:** Es importante abordar este tema ya que todos los estudios sobre sismología y sismicidad tienen que ver con lo que ocurre en el interior del planeta. El planeta Tierra se divide en tres capas principales: la corteza, el manto y el núcleo.

a. **Corteza:** La corteza terrestre es la capa más superficial del planeta y es la parte que está en contacto directo con la atmósfera y la biósfera. Esta capa se subdivide en dos: la corteza oceánica y la corteza continental. (Maracano J. 2002)

1) **Corteza Continental:** Esta corteza tiene un espesor medio de 35 km., sin embargo, puede alcanzar varios kilómetros más llegando hasta 60 o 70 en zonas montañosas. Posee una densidad promedio de $2,700 \text{ kg/m}^3$. Las principales rocas que la componen son sedimentarias y volcánicas. (Maracano J. 2002)

2) Corteza Oceánica: Esta capa tiene un espesor aproximado de 10 km., sin embargo en algunos puntos como el Rift Valley alcanza valores cercanos a 0. En este lugar aflora el magma proveniente de la capa siguiente. La corteza oceánica se encuentra principalmente formada por sedimentos y basaltos metamórficos. (Maracano J. 2002)

Ilustración 1: Corteza Terrestre



Fuente: Vizuete. Análisis, diseño e implementación de un Datamart para el área de sismología del departamento de geofísica de la escuela politécnica nacional. Pág.27

b. Manto: El manto es la capa directamente ubicada después de la corteza, y esta tiene un espesor mucho mayor, siendo de aproximadamente 1,900 km. El manto terrestre es delimitado por la discontinuidad de Mohorovicic, estando esta situada a diferentes profundidades hacia el núcleo. Esta capa se encuentra principalmente formada por peridotitas, rocas mucho más densas por causa de la presión de suelo y rocas sobre las primeras. Algunos científicos dividen a su vez el manto en superior e inferior para indicar un diferencial en densidad y composición química y física. Para este trabajo no se entrará en detalle. (Maracano J. 2002)

c. Núcleo: Este posee un radio promedio de 3,470 km., tomando en cuenta que es una esfera casi perfecta. El principal compuesto de esta capa es el hierro el cual en su mayor porción se encuentra fundido ya que la temperatura varía entre 3700 °C y 4300 °C. Además de hierro existen residuos de níquel, sulfuros y silicio. (Maracano J. 2002)

Ilustración 2: Interior de la tierra



Fuente: JMarcano. El planeta Tierra. Recuperado el 3 de septiembre de 2012.

3. Sismología

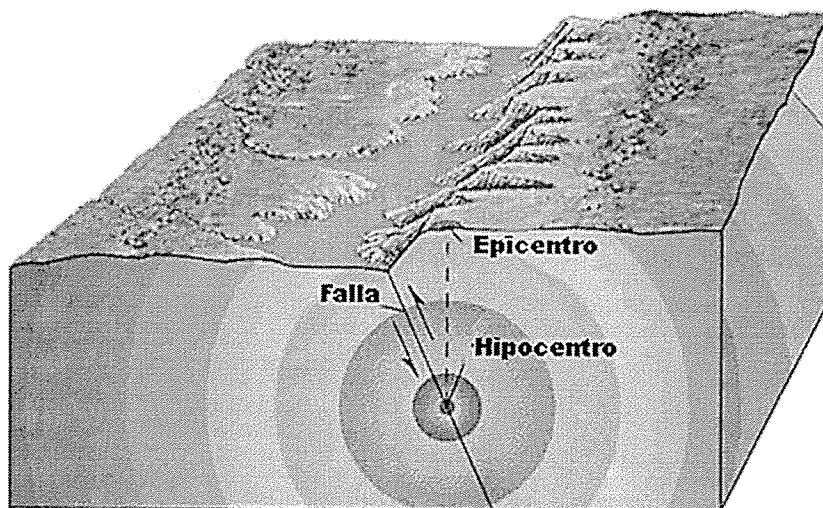
a. Definiciones:

1) **Sismo:** Los sismos son liberaciones de energía repentinas originadas en un principio por el movimiento del magma ubicado en el núcleo terrestre. Este movimiento genera distorsión de las capas superiores a este y ya que la corteza terrestre es relativamente delgada para la enorme cantidad de energía liberada por ese movimiento (sismo), este viaja a través de la corteza generando posibles catástrofes en la superficie. (Bioygeo, 2007)

2) **Hipocentro:** Se llama Hipocentro al punto exacto localizado en el que ocurre la liberación de energía del sismo. (Bioygeo, 2007)

3) **Epicentro:** Es el punto ubicado en la superficie terrestre localizado directamente sobre el Hipocentro. Comúnmente se utiliza el nombre epicentro queriendo significar hipocentro, sin embargo, es un error técnico. (Bioygeo, 2007)

Ilustración 3: Terremoto, hipocentro y epicentro



Fuente: Ordoñez. El terremoto, el epicentro y el hipocentro. 2009

b. Tipos de onda: La liberación de energía, mencionada anteriormente traducida comúnmente como sismo, viaja de distintas formas a través de las diversas capas ya mencionadas (en especial la corteza terrestre). Esta onda se transmite de capa en capa teniendo como medio de conducción el suelo y las rocas. Al ser transmitida por agua o regiones superficiales pantanosas, la onda tiende a incrementar su velocidad (en específico la onda "P" la cual será detallada a continuación). El ejemplo más común de esto ocurre en México, Distrito Federal. La ciudad está construida en una región que antiguamente era un pantano, por lo que el suelo sufre de licuefacción fácilmente y en el caso de los sismos, las ondas tienden a incrementar su energía de velocidad teniendo consecuencias nefastas en algunos casos. (Bioygeo, 2007)

Existen diversos tipos de onda clasificados según su velocidad e intensidad de traslación y propagación por medio del suelo; estas son: la onda P, S, Rayleigh y Love.

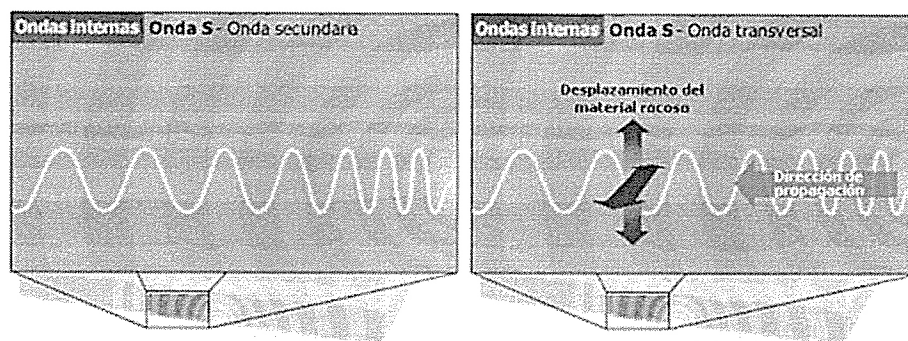
1) **Onda P:** La onda P u onda primaria viaja a velocidades bastante altas, entre 6 y 8 km/s y se transmite por el interior de la tierra. Su principal característica yace en los esfuerzos de compresión que genera en el suelo en dirección a su movimiento y genera únicamente movimientos de atrás hacia adelante. También tiene la particularidad de que posee la capacidad de transmitirse por medios líquidos. (Bioygeo, 2007)

2) **Onda S:** Esta onda viaja a velocidades menores a la onda P, por lo que primero se recibe la P y generalmente algunos segundos después la S.

También se desplaza por medio sólido no así por líquido y tiene la particularidad de trabajar superficialmente de arriba hacia abajo. Esta última no afecta tanto las estructuras ya que es contrarrestada por el peso propio de las mismas.

Obviando la dirección de empuje, tanto la onda P como la S tienen varias características adicionales en común. Cuando alguna de estas encuentran algún límite, son divididas en varias ondas de menor intensidad llamadas secundarias y se dirigen a direcciones distintas; este caso se muestra a continuación:

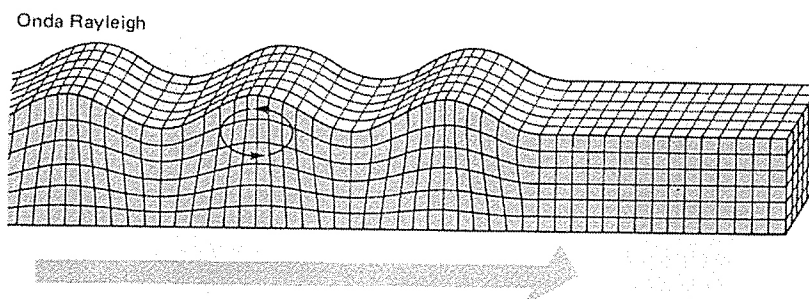
Ilustración 4: Onda S



Fuente: Vizuite. Análisis, diseño e implementación de un Datamart para el área de sismología del departamento de geofísica de la escuela politécnica nacional. Pág.21

3) **Onda Rayleigh:** Además de las ondas que viajan a través de la corteza existen ondas que viajan a nivel superficial. Una de ellas es la Rayleigh. Esta genera movimientos paralelo, siempre en forma senoidal. Su velocidad es la más lenta de todas las ondas existentes; aproximadamente un 70% de la velocidad de la onda Love. (Bioygeo, 2007)

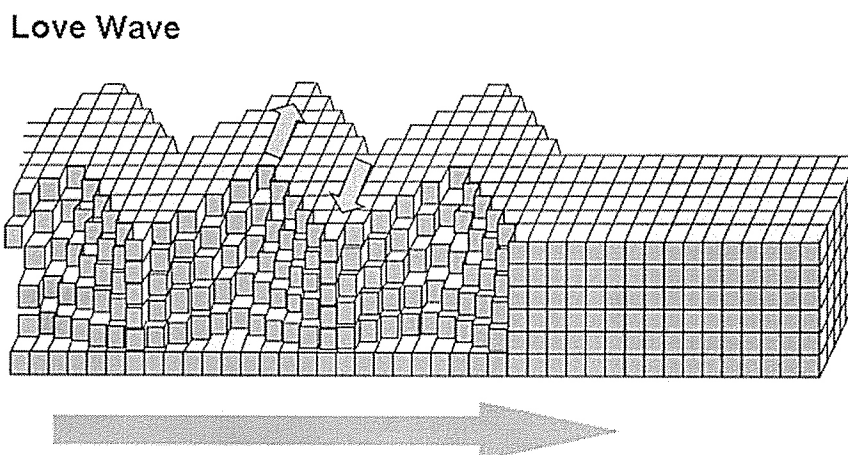
Ilustración 5: Onda Rayleigh



Fuente: Centro de estudios y experimentación de obras públicas. 2008.

4) **Onda Love:** Esta onda también viaja superficialmente y con movimientos horizontales de corte (como lo muestra la figura). (Bioygeo, 2007)

Ilustración 6: Onda Love



Fuente: Centro de estudios y experimentación de obras públicas. 2008.

Estos dos últimos tipos de onda son los únicos que pueden ser vistos por el ser humano. A continuación se muestra una imagen panorámica del paso de estas ondas a través de la superficie.

Ilustración 7: Ejemplificación de la onda Love



Fuente: cmcirubide. Ciencias mundo contemporáneo. 2009

c. Tectónica de placas: (Astronomía 2006).

1) La Deriva Continental: La deriva continental es la teoría base para la tectónica de placas y se fundamenta en que hay distintas placas en la corteza terrestre, es decir, que la corteza no es una sola porción de suelo y roca unida uniformemente sino que está fragmentada. Estas fracturas de corteza tienen un movimiento muy lento pero que es continuo en el tiempo y en ocasiones existen colisiones. La velocidad en promedio del movimiento de las placas es de 2-20 cm/año.

Alfred Wegener, publicó la teoría de la formación de los continentes aunque fue originalmente propuesta por Antonio Snider en 1858. Esta hipótesis en su momento, hablaba de que no siempre hubo 5 continentes como los hay ahora, sino que en un principio, hace millones de años, existió un solo mega continente al que llamó Pangea. (Astronomía 2006).

Ilustración 8: Pangea



Fuente: Astronomía. Pangea y los movimientos de placas. 2006.

Esta idea nació cuando Snider logró darse cuenta que el continente actual de África se podía unir casi perfectamente con América central y del Sur. Y de la misma forma con los demás continentes, de tal suerte que esta hipótesis fue aceptada mundialmente.

El movimiento de las placas es continuo aunque ya vimos que las velocidades son demasiado pequeñas para que una persona pueda notar un cambio drástico a lo largo de su vida. Pero, aunque lento, es un movimiento que continúa y, por lo tanto, la Tierra sigue en constante cambio por causa de la actividad interna. (Astronomía 2006).

2) Placas tectónicas: Las principales placas que existentes

hoy en día son:

- Sudamérica, Norteamérica, Euroasiática, Indo australiana, Africana, Antártica y Pacífica.

Las placas secundarias son:

- Cocos, Nazca, Filipina, Árabe, Escocesa, Juan de Fuca y placa del Caribe.

Ilustración 9: Placas tectónicas



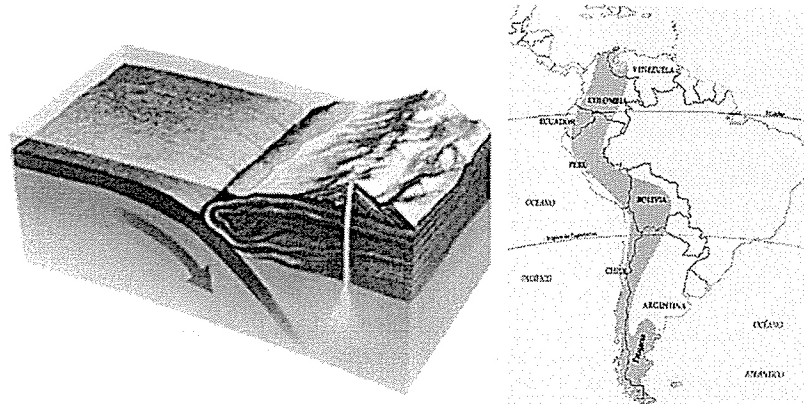
Fuente: Vizuet. Análisis, diseño e implementación de un Datamart para el área de sismología del departamento de geofísica de la escuela politécnica nacional. Pág.29

3) Interacción entre placas: Existen varios tipos de interacción entre las placas vistas anteriormente dentro de la corteza. Los actualmente descubiertos son cuatro: Subducción, deslizamiento, extrusión y acrecencia. (Astronomía 2006).

a) *Subducción (Convergencia):* Este fenómeno ocurre generalmente en el litoral, en donde una placa oceánica colisiona y se mete por debajo de una placa continental; de tal forma que la primera se funde en la continental generando cadenas montañosas tal como la famosa Cordillera de los Andes, la cual

está a lo largo del litoral de Sudamérica y Centroamérica con el pacífico. (Astronomía 2006).

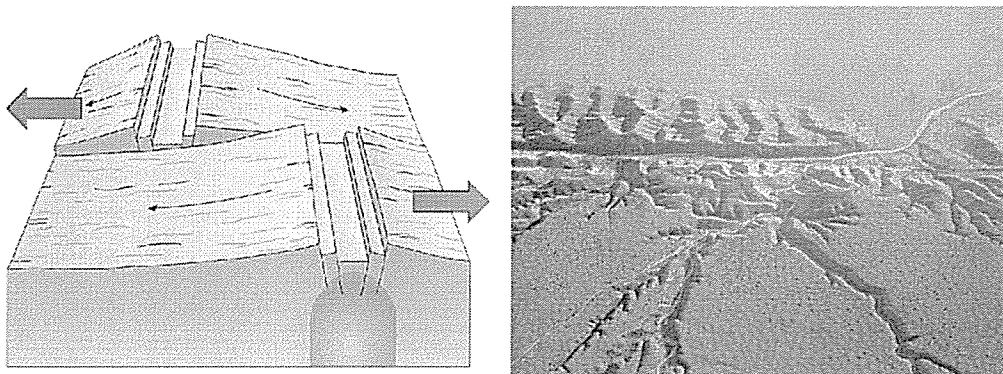
Ilustración 10: Subducción y cordillera de los Andes



Fuente: tectonicaprimeroa.2012. Zonas de subducción y colisión entre placas.

b) *Deslizamiento*: Esta interacción se da cuando dos placas se deslizan al mismo nivel, una con otra. En este tipo de movimiento no existe un choque frontal, únicamente deslizamiento. Un ejemplo claro de este fenómeno es la falla de San Andrés. (Astronomía 2006).

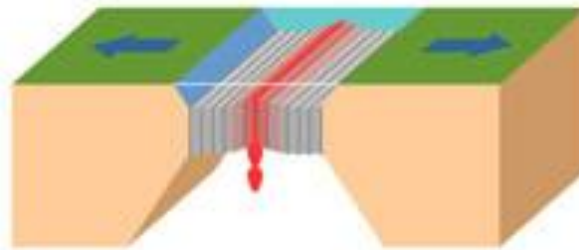
Ilustración 11: Deslizamiento y falla de San Andrés



Fuente: tectonicaprimeroa.2012. Zonas de subducción y colisión entre placas.

c) *Divergencia y Dorsales Oceánicas*: La divergencia ocurre en las zonas en las que el magma por debajo de la corteza tiene ciertos movimientos conectivos que provocan la separación de dos placas. En este caso se abre una abertura y el magma asciende a la superficie. Aquí es cuando se forman las dorsales oceánicas las cuales son accidentes demográficos ubicados en el fondo del océano y que tienen cientos de kilómetros del largo con una altura aproximada de 2000 a 3000 metros y tienen un surco en el centro llamado “rift” en donde sale todo el magma. También existe otra salida de magma que regularmente ocurre en el fondo del océano y es llamado “hot spot” o “punto caliente” en español. (Astronomía 2006).

Ilustración 12: Divergencia



Fuente: Bioygeo. 2007. Estructura de la Tierra.

d) *Fallas tectónicas (tipos de falla)*: Anteriormente vimos los conceptos y el funcionamiento de la tectónica de placas en el interior de la corteza terrestre, ahora veremos lo que ocurre en la superficie media vez ocurre alguna interacción entre placas. (Astronomía 2006).

1) **Definiciones.**

a) *Falla*: Una falla es una discontinuidad en el terreno superficial. Esto es provocado en el plano de falla como consecuencia del movimiento relativo de los bloques de falla. (Astronomía 2006).

b) *Plano de falla*: El plano de falla es la superficie plana a lo largo de la cual se desplazan las placas. Dicho plano puede tener varias orientaciones tales como vertical, horizontal o diagonal. (Astronomía 2006).

c) *Bloque de falla*: Los bloques de falla son los que delimitan la falla, es decir los trozos de suelo que la generan. En el caso de falla

diagonal, el bloque que está en la parte superior se llama bloque colgante y al que se encuentra por debajo se le denomina bloque yacente. (Astronomía 2006).

2) **Clasificación de las fallas:** Este punto es similar a los tipos de interacción entre placas que ya vimos anteriormente, pero no es igual. Existen cuatro tipos de falla que se observan en la Tierra. (Ver Ilustración 13).

a. *Falla Normal:* El comportamiento del origen de esta falla se da cuando los dos bloques de falla se separan el uno del otro. Uno de los dos se hunde literalmente desplazándose hacia abajo mientras que el otro relativamente se mueve hacia arriba. (Astronomía 2006).

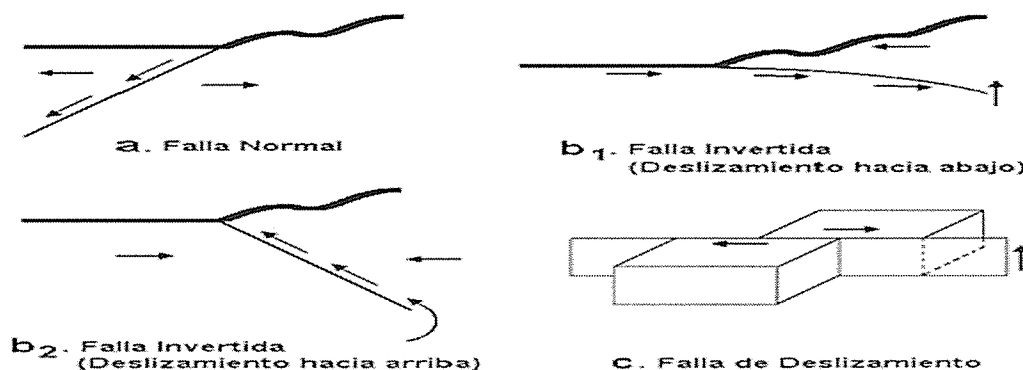
b. *Falla Invertida:* La naturaleza de este tipo de falla es de compresión y se subdivide en dos casos. (Astronomía 2006).

c. *Deslizamiento hacia abajo:* Uno de los dos bloques está penetrando el otro, de tal forma que esto es análogo a la subducción entre placas. (Astronomía 2006).

d. *Deslizamiento hacia arriba:* Uno de los dos bloques está deslizándose hacia arriba del otro debido a la compresión generada en ellos. (Astronomía 2006).

e. *Deslizamiento:* Este tipo de falla es generado por el movimiento horizontal paralelo de por lo menos uno de los bloques. Si uno de los bloques se mueve hacia la izquierda, el otro se mueve relativamente hacia la derecha (aunque en realidad esté estático). Este tipo de falla es análogo al tipo de interacción por deslizamiento entre placas. (Astronomía 2006).

Ilustración 13: Clasificación de fallas

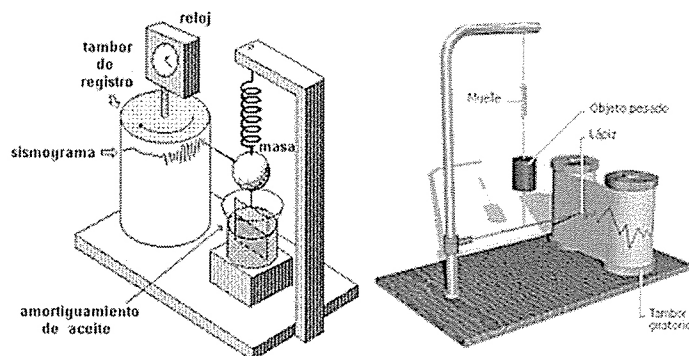


Fuente: Fuente: Vizuete. Análisis, diseño e implementación de un Datamart para el área de sismología del departamento de geofísica de la escuela politécnica nacional. Pág.33

d. **Instrumentos de medición.** La ciencia siempre ha buscado la forma de cuantificar y medir la intensidad de un sismo, y para ello se han inventado algunos mecanismos esto. Entre los más comunes destaca el sismógrafo, inventado por el alemán Emil Wiechert quien a finales del siglo XIX desarrollo el sismógrafo horizontal. (Tectónica Primero 2012)

1) **El sismógrafo:** El sismógrafo es una herramienta sensible que detecta los movimientos del suelo respecto a su estado estático normal, por mínimo que este movimiento sea. Aunque el sismógrafo se inventó a finales del siglo antepasado y perfeccionado durante el siglo pasado, su funcionamiento principal no ha cambiado. (Tectónica Primero 2012)

Ilustración 14: Sismógrafo

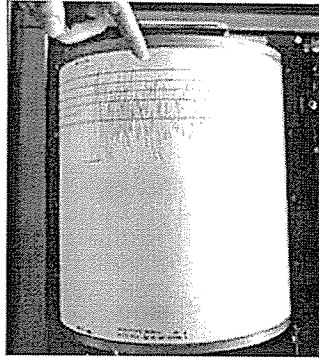


Fuente: Fuente: Vizuet. Análisis, diseño e implementación de un Datamart para el área de sismología del departamento de geofísica de la escuela politécnica nacional. Pág.23

Básicamente es una máquina que registra sobre papel el movimiento lateral o vertical del suelo. Sin embargo, Wiechert tuvo un problema; si el mismo suelo es el que se está moviendo cómo tener una referencia de algún objeto que no estuviera en movimiento. Entonces fue cuando recurrió al principio de inercia de física. Colgó una masa de un resorte, y a su vez esta masa la ató a la base del dispositivo, de tal forma que la masa no estaba colgando y un pequeño movimiento la hacía desplazarse pero siempre queriendo regresar a su posición original, por amortiguamiento propio del sistema. (Tectónica Primero 2012)

Luego de esto el resto es sencillo, fue suficiente con atar un lápiz a la masa para que esta indicara sobre papel el desplazamiento lateral o vertical del sismo. Este papel se llama sismograma. (Tectónica Primero 2012)

Ilustración 15: Sismograma



Fuente: Fuente: Vizúete. Análisis, diseño e implementación de un Datamart para el área de sismología del departamento de geofísica de la escuela politécnica nacional. Pág.23

Hoy en día se registran todos los datos en medios magnéticos o utilizando sistemas digitales para aumentar la precisión. El control de los tiempos se lleva por medio de tecnología GPS.

En 1960 se observó un avance muy importante en el desarrollo de las estaciones sísmicas en el mundo utilizando patrones geométricos. Al día de hoy se cuenta con más de 1,000 estaciones independientes en diversos países con tecnología avanzada capaz no sólo de medir el movimiento del sismo como tal sino de captar el hipocentro, el epicentro (por medio de una triangulación de estaciones de datos), las velocidades de las ondas así como los tipos de onda. (Tectónica Primero 2012)

e. **Medición de la intensidad sísmica.** Continuando el tema de cuantificación y medición de sismos, ahora veremos los dos sistemas o métodos que se han desarrollado para ello.

1) **La escala de Richter.** Esta escala determina la magnitud de un sismo equivalente en kilogramos de explosivo asignándosele un número que generalmente va del 2 al 10. Es una escala logarítmica por lo que no se puede hablar de proporcionalidad. Por ejemplo la diferencia de la magnitud 2 a la 3 es únicamente de 1,744kg, mientras que la diferencia de la 3 a la 4 es de 54,200kg y así sucesivamente. (Edu4hazards 2012)

En la siguiente ilustración se puede ver la recurrencia a nivel mundial de los sismos de diferentes magnitudes. Por ejemplo un sismo de magnitud 2 tiene una recurrencia de 1,000,000 de sismos al año. Uno de magnitud 3 tiene una recurrencia de

1,000,000 de sismos al año. Uno de magnitud 3 tiene una recurrencia de 100,000 sismos al año. Y así hasta llegar a los de grado 8, 9 y 10 los cuales de 0 a 3 veces por año. (Edu4hazards 2012)

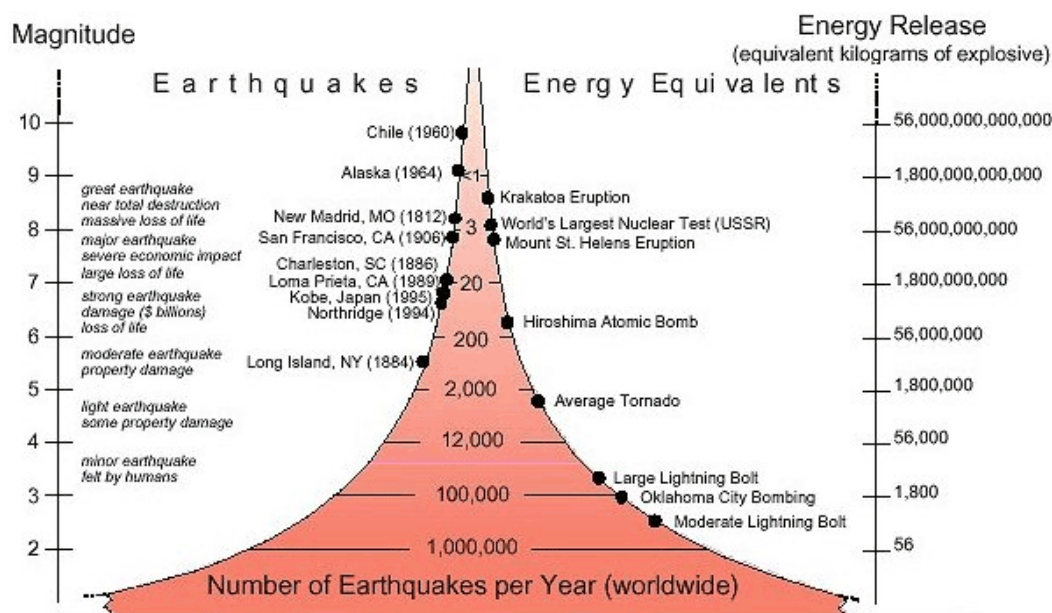
A continuación se indica un aproximado de los daños que puede llegar a generar los sismos clasificados por su magnitud:

Cuadro 1: Magnitud vs. daños colaterales en la escala de Richter

Magnitud	Daños colaterales
3-4	Sismo menor percibido por el ser humano
4-5	Sismo leve, pero con algunos daños a propiedades
5-6	Sismo moderado con algunos daños a propiedades
6-7	Sismo fuerte, pérdidas de millones de dólares y algunas pérdidas humanas.
7-8	Sismo fuerte, pérdidas severas de millones de dólares y muchas pérdidas humanas.
8-9	Gran sismo, destrucción total.

Fuente: Elaboración propia

Ilustración 16: Escala de Richter



Fuente: edu4hazards. 2007.

3.4.1. Escala de Mercalli: A diferencia de la escala anterior en la que se observaban mediciones cuantitativas, la escala de Mercalli tienen mediciones cualitativas. Contrario a lo que se podría pensar, esta escala muchas veces sirve más a los ingenieros civiles que la de Richter porque da una idea de todas las consecuencias

posibles dependiendo de la intensidad del sismo. Sin embargo, la escala de Richter es primordial para la ingeniería estructural. (Edu4hazards 2012)

Esta escala está dividida en 12 puntos. Las escalas menores están asociadas a la percepción humana del sismo y las escalas más grandes a las consecuencias de daños estructurales. En general evalúa la intensidad del sismo. (Edu4hazards 2012)

Ilustración 17: Escala de Mercalli

Grado	Descripción
I. Muy débil	No se advierte sino por unas pocas personas y en condiciones de perceptibilidad especialmente favorables.
II. Débil	Se percibe sólo por algunas personas en reposo, particularmente aquellas que se encuentran ubicadas en los pisos superiores de los edificios.
III. Leve	Se percibe en los interiores de los edificios y casas.
IV. Moderado	Los objetos colgantes oscilan visiblemente. La sensación percibida es semejante a la que produciría el paso de un vehículo pesado. Los automóviles detenidos se mecen.
V. fuerte	La mayoría de las personas lo percibe aun en el exterior. Los líquidos oscilan dentro de sus recipientes y pueden llegar a derramarse. Los péndulos de los relojes alteran su ritmo o se detienen. Es posible estimar la dirección principal del movimiento sísmico.
VI. Bastante Fuerte	Lo perciben todas las personas. Se siente inseguridad para caminar. Se quiebran los vidrios de las ventanas, la vajilla y los objetos frágiles. Los muebles se desplazan o se vuelcan. Se hace visible el movimiento de los árboles, o bien, se les oye crujir.
VII. Muy fuerte	Los objetos colgantes se estremecen. Se experimenta dificultad para mantenerse en pie. Se producen daños de consideración en estructuras de albañilería mal construidas o mal proyectadas. Se dañan los muebles. Caen trozos de mampostería, ladrillos, parapetos, cornisas y diversos elementos arquitectónicos. Se producen ondas en los lagos.
VIII. Destructivo	Se hace difícil e inseguro el manejo de vehículos. Se producen daños de consideración y aun el derrumbe parcial en estructuras de albañilería bien construidas. Se quiebran las ramas de los árboles. Se producen cambios en las corrientes de agua y en la temperatura de vertientes y pozos.
IX. Ruinoso	Pánico generalizado. Todos los edificios sufren grandes daños. Las casas sin cimentación se desplazan. Se quiebran algunas canalizaciones subterráneas, la tierra se fisura.
X. Desastroso	Se destruye gran parte de las estructuras de albañilería de toda especie. El agua de canales, ríos y lagos sale proyectada a las riberas.
XI. Muy desastroso	Muy pocas estructuras de albañilería quedan en pie. Los rieles de las vías férreas quedan fuertemente deformados. Las cañerías subterráneas quedan totalmente fuera de servicio.
XII. Catastrófico	El daño es casi total. Se desplazan grandes masas de roca. Los objetos saltan al aire. Los niveles y perspectivas quedan distorsionados.

Fuente: Terremotos-elmundo. 2010

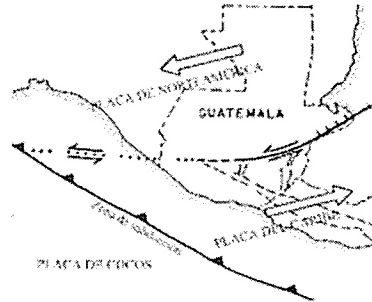
f. Marco de vulnerabilidad y amenaza sísmica en

Guatemala:

1) Introducción. La realidad del país de Guatemala en el tema de vulnerabilidad sísmica es bastante serio. En el diseño estructural se toma el mayor riesgo para diseñar estructuras en el área del Sur y Centro del país. Guatemala está clasificado como zona roja a nivel mundial. Esto es sencillamente porque está en el punto límite de tres placas, la de Norteamérica, la del Caribe y la de Cocos. La interacción que tienen las placas de Norteamérica con la del Caribe es de tipo

“deslizamiento” o “transcurrente” y esto genera las fallas de Polochic-Chixoy y la del Motagua. Por otro lado la interacción de las placas Cocos con la del Caribe es de tipo “subducción-convergente”. Esto último se da en la región sur-oeste del país y ha generado a través de miles de años la cordillera de volcanes que existen a lo largo del litoral. (Vizuete M. 2006)

Ilustración 18: Amenazas sísmicas en Guatemala



Fuente: Fuente: Vizuete. Análisis, diseño e implementación de un Datamart para el área de sismología del departamento de geofísica de la escuela politécnica nacional. Pág.23

Las fallas mencionadas anteriormente generan a su vez fallas secundarias en el interior y capital del país tales como: Jalpatagua, Mixco, Santa Catarina Pinula. (Vizuete M. 2006)

2) Historia de la sismología en Guatemala. El primer sismógrafo instalado y utilizado en Guatemala fue en el Observatorio Nacional en 1925. Más tarde, en los años setenta se instalaron seis sismógrafos electromagnéticos, los cuales estaban siendo lanzados alrededor del planeta por varios descubrimientos hechos en ese entonces. (Vizuete M. 2006)

En esta década también fueron instalados varios sismoscopios en la ciudad capital y varios puntos del interior del país. Sin embargo, fue hasta 1976, después del terremoto de 7.5 grados en la escala de Richter que el gobierno de ese tiempo decidió crear el Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH).

Por último, se creó una sede del ya existente en aquel entonces Centro de Coordinación para la Prevención de los Desastres Naturales en América Central. Este centro apoyó también el fortalecimiento de los proyectos y centros sismológicos de la región. Parte de este proyecto fue ayudar a contribuir con equipo tecnológico para medición y cuantificación de sismos. (Vizuete M. 2006)

3) **Historial de sismos en Guatemala:** A continuación se presenta un recuento de los sismos medianos y severos recopilados desde 1902 hasta 1998 en el país de Guatemala. Se observa un periodo de recurrencia para sismos fuertes (entre 7 y 8 grados de magnitud en la escala de Richter) de aproximadamente 40 años. (Vizuet M. 2006)

Ilustración 19: Resumen de sismos en Guatemala (1908-1998)

AÑO	DÍA/MES	HORA	MAGNITUD	LOCALIZACION	DAÑOS.
1902	18/abril	20:23:50	7.5.	14.90 grados de latitud Norte, 91.50 grados de longitud Oeste, y 60 Km. de profundidad aproximadamente	Principalmente en Quetzaltenango y Sololá. Hubo reportes de aproximadamente 200 muertos, sin embargo es difícil pensar que un evento tan fuerte no cobrara más vidas
1913	8/marzo	08:55	ND	Norte 5 a 6.5 Km. profundidad. No se tiene localización exacta del epicentro.	Destrucción de Cuilapa, cabecera departamental de Santa Rosa, reportó muchas víctimas.
1917	27/noviembre 26/diciembre	05:21:00		alrededores a la capital (50 Km. por lo menos	Sus más fuertes efectos se sintieron en el municipio de Villa Nueva, equivocadamente la población lo consideró parte de la actividad del volcán de Pacaya. Más de 250 personas muertas. Destruyó el centro de la capital.
1918	4,11/enero 27 de febrero	07:30 04:30.10 y 04:32.25	6 grados	alrededores a la capital (50 Km. por lo menos	Viviendas destruidas, edificios rajados, personas heridas y aproximadamente 200 muertos.
1942	6/agosto	23:36.98	8.3	13.9 grados latitud Norte y 90.8 grados longitud Oeste. La profundidad fue de 60 Km.	El de mayor magnitud en la historia causando casas destruidas, edificios dañados, destruidos, derrumbes en carreteras, personas fallecidas y heridos en los departamentos de: Guatemala, Sacatapéquez, Chimaltenango, San Marcos Tonicapán, Quiché, Sololá y Escuintla. En los departamentos de Santa Rosa, Chiquimula, Alta y Baja Verapaz, se reportaron pocos daños materiales, pero fue sensible en casi todos los municipios.
1959	20 febrero	18:16.33	ND	15.94 grados latitud Norte y 90.59 grados longitud Oeste, profundidad fue 48 Km.	Presentó los estragos más importantes en la población de Ixcán, departamento de El Quiché.

Continuación Ilustración 19

AÑO	DÍA/MES	HORA	MAGNITUD	LOCALIZACION	DAÑOS.
1976	4 febrero	03:03:33	7.5 grados	15.32 grados latitud Norte y 89.10 grados longitud Oeste 5 Km. de profundidad	Dstrucción de miles de viviendas en las zonas adyacentes, incluyendo el valle de la ciudad capital, se registraron cerca de 25,000 muertos y 75,000 heridos y aunque no se fijaron cifras exactas, se calcula que las pérdidas excedieron 1250,000,000 de dólares estadounidenses Activación del sistema de fallas de Mixco.
1985	11 octubre	03:39:17	5.0 grados	15.3 grados latitud Norte y 90.9 grados longitud Oeste 5 Km. de profundidad	Destruyó Uspantán casi por completo
1991	18 septiembre	03:48:13	5.3 grados	Sur-Oeste de Chimaltenango: profundidad 32 Km.	Dstrucción de viviendas, bloqueo de los ríos El Jiote y Nicán correntadas de lodo a los alrededores debido a la composición geológica existente. destrozos de por lo menos el 80% de la población de San Miguel Pochuta,
1995	19 diciembre	14:56:06	5.3	Alta Verapaz , profundidad de 10 Km.	Se reportaron algunas casas dañadas en San Miguel Tukurú y Tamahú, también hubo varios deslizamientos de tierra en la región epicentral, murió una persona y varios heridos.
1998	10 enero	02:20:10	5.8	14° 00.13'N, 91° 45.60'W profundidad 33 Km.	Daños en Quetzaltenango, Retalhuleu, Suchitepéquez, San Marcos, Sololá, Totonicapán, Escuintla y la Ciudad Capital. También fue sensible en Huehuetenango, Alta Verapaz, Baja Verapaz, Santa Rosa; Tapachula, México; y en El Salvador

B. Dinámica estructural y sismo resistencia

1. Conceptos introductorios

a. Definiciones:

1) **Dinámica estructural:** Este concepto se refiere al comportamiento de cualquier estructura de cualquier tipo, bajo la acción de cargas dinámicas. Estas cargas pueden ser de diversas naturalezas, por ejemplo: viento, sismo, vibraciones por maquinaria, movimiento de agua etc.

2) **Sismo resistencia:** Este término se utiliza generalmente en el campo de la ingeniería civil y en específico en el diseño de estructuras. La sismo resistencia no es más que dotar a una estructura determinada de ciertas características, normadas por asociaciones especializadas en el diseño sismo resistente, cuya finalidad tiende a contrarrestar la fuerza sísmica recurrente. En el presente trabajo de graduación, los conceptos de sismo resistencia serán orientados a la aplicación en estructuras de edificios. (Umss, 2012)

b. **Leyes de Newton:** Isaac Newton nació en 1642 y murió en 1727, fue un personaje inglés cuyo estudio se centró en el movimiento de los cuerpos luego de la muerte de Galileo. Newton desarrolló las ideas que en un principio tuvo Galileo y las llevó a su madurez. Es el pilar más importante de la física clásica. A continuación se citan las 3 leyes formuladas por él (Umss, 2012):

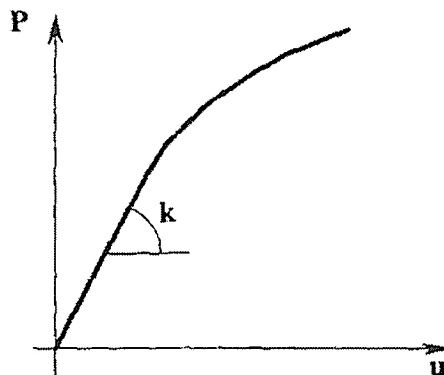
1) Primera Ley de Newton: *"Todo cuerpo permanece en su estado de reposo, o movimiento uniforme rectilíneo, a menos que sea obligado a cambiar ese estado debido a la aplicación de cualquier tipo de fuerzas."*

2) Segunda Ley de Newton: *"La fuerza que actúa sobre un cuerpo y causa su movimiento, es igual a la tasa de cambio del momentum del cuerpo. "*

3) Tercera Ley de Newton: *"A toda acción se opone siempre una reacción de igual magnitud; o las acciones mutuas entre dos cuerpos son siempre iguales y opuestas. "* (Luis Enrique García, 1998:4).

c. **Rigidez:** Cuando un cuerpo con cierto grado de elasticidad es sometido a una fuerza actuante este es propenso a tener una deformación, por más pequeña que esta sea. A continuación se muestra una grafica común para un cuerpo elástico. (Umss, 2012)

Ilustración 20: Esfuerzo-deformación para un material elástico



La rigidez es la capacidad de un material o sistema estructural a resistir esta deformación. Este concepto se define por la letra "k". En la gráfica anterior podemos ver que la rigidez se define como el coeficiente director de la parte lineal; por lo tanto $k = \frac{P}{u}$.

El ejemplo más común en la Ingeniería Civil es el comportamiento del acero estructural A992.

Ilustración 21: Esfuerzo-Deformación para acero A992

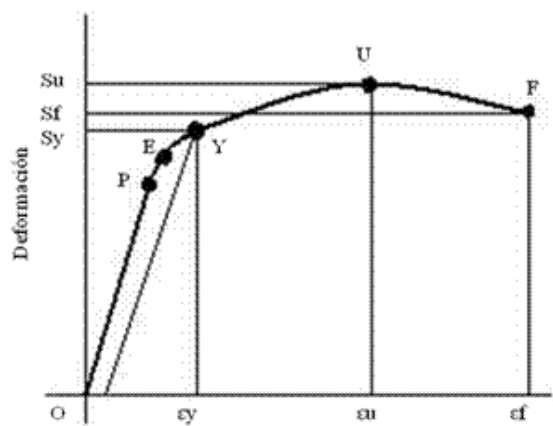
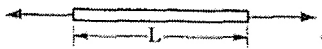
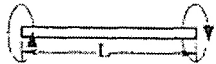

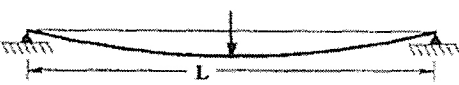
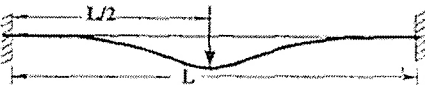
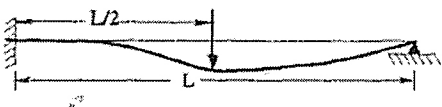
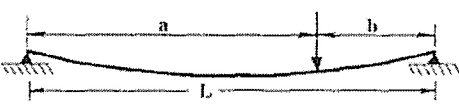


Ilustración 22: Tabla de rigideces para vigas

<p><i>Barra sometida a fuerza axial:</i></p> 	$k = \frac{AE}{L}$
<p><i>Barra sometida a torsión:</i></p> 	$k = \frac{JG}{L}$
<p><i>Barra en voladizo:</i></p> 	$k = \frac{3EI}{L^3}$
<p><i>Barra simplemente apoyada, fuerza transversal en el centro de la luz:</i></p> 	$k = \frac{48EI}{L^3}$
<p><i>Barra empotrada-empotrada, fuerza transversal en el centro de la luz:</i></p> 	$k = \frac{192EI}{L^3}$
<p><i>Barra empotrada-simplemente apoyada, fuerza transversal en el centro de la luz:</i></p> 	$k = \frac{768EI}{7L^3}$
<p><i>Barra simplemente apoyada, fuerza transversal en el cualquier punto:</i></p> 	$k = \frac{3EIL}{a^2b^2}$

d. Amortiguamiento: Este concepto se definirá más al detalle ya que es un punto central para el desarrollo de este trabajo. (Umss, 2012)

El amortiguamiento en una estructura se refiere a la capacidad de esta a disipar o perder energía. Básicamente, este proceso ocurre de la siguiente manera: el dispositivo se somete a fuerzas las cuales se pueden traducir en energía (tal como cinética y potencial). Esta energía actuante se va a transformando en ruido, calor o mayormente en una deformación del mismo material. Esta pérdida de energía se debe

al amortiguamiento de la estructura. Hoy en día el amortiguamiento se describe de diversas formas tales como el Amortiguamiento Viscoso, el de Coulomb y el Histerético.

1) Amortiguamiento Viscoso: Este tipo de amortiguamiento es probablemente el más común considerando todas las fuentes de amortiguación. Se debe, como su nombre lo indica, a la viscosidad del fluido en el que se encuentra inmerso el objeto en cuestión, la cual genera una fuerza en contra del movimiento actuante y es directamente proporcional a la velocidad del objeto. Para este caso el coeficiente de amortiguamiento se designa comúnmente con la letra “c” y por consiguiente la fuerza es igual a $c\dot{x}$ en donde \dot{x} es la velocidad con respecto a la posición. (Banchmann, R. 1981)

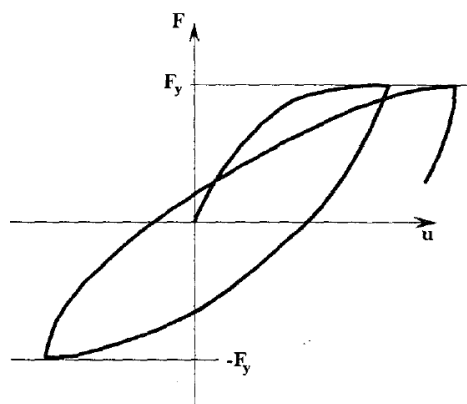
2) Amortiguamiento de Coulomb: Este describe básicamente el fenómeno de fricción dinámica que ocurre cuando un objeto es arrastrado por una superficie que no es completamente lisa. La fuerza desarrollada se opone a la velocidad y adquiere un valor únicamente cuando el objeto está en movimiento. Se define como $F = \mu N$ en donde μ es el coeficiente de fricción dinámica y N es la fuerza normal ejercida como la reacción de la superficie en contacto con el objeto. (Banchmann, R. 1981)

3) Amortiguamiento Histerético: La palabra histéresis en la dinámica se refiere al comportamiento particular en una estructura en el cual su respuesta frente a la acción de una fuerza va a depender de la respuesta anterior. Es decir, la estructura va a estar sometida a movimientos invertidos cuando está en el rango inelástico o no lineal. La curva de carga no va a ser igual a la de descarga. (Banchmann, R. 1981)

Esto lo explica Luis Enrique García (1998:12) de la siguiente manera: “El hecho de que la curva de carga tenga una trayectoria diferente a la curva de descarga conduce a que no toda la energía de deformación acumulada en el elemento se convierta en energía cinética en el ciclo de descarga”.

A continuación se muestra gráficamente este concepto en el cual se puede observar cómo la curva de carga de esfuerzo-deformación llega al límite de fluencia en el que hay deformación sin haber un aumento del esfuerzo (límite plástico) y justo después, la curva de descarga la cual no regresa a su forma inicial, llega hasta el límite de fluencia en el otro sentido. (Banchmann, R. 1981)

Ilustración 23: Curva fuerza-deformación para material inelástico

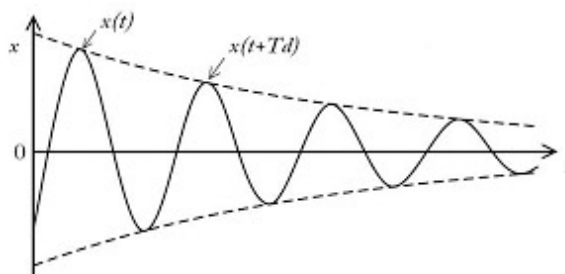


Fuente: Sc. Ehu. 2010. Oscilaciones.

Este concepto es de suma importancia ya que bajo la acción de un sismo severo o de condiciones extremas de viento esto puede ocurrir.

Lo anterior fue referente a esfuerzos versus deformaciones. Sin embargo en el caso de un edificio de gran o baja altura, es muy útil representar una grafica de movimiento versus tiempo como se puede ver a continuación:

Ilustración 24: Movimiento vs. Tiempo



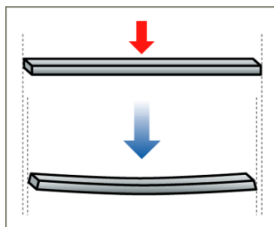
Fuente: Sc. Ehu. 2010. Oscilaciones.

$X(t)$ representa el desplazamiento lateral que la estructura tendrá como respuesta inmediata al sismo; también se le llama "deriva". Esta gráfica será explicada matemáticamente más adelante en este trabajo.

2. Sistemas con un grado de libertad.

a. **Introducción:** Se entiende por “n” grados de libertad al número de sentidos o direcciones que puede tomar un dispositivo como respuesta a una fuerza o energía. En la teoría estos grados de libertad son simplificados considerablemente ya que en la realidad son casi infinitos los grados que tiene un dispositivo dinámico. Para fines académicos y de modelación únicamente se toman unos cuantos. En este punto se considerarán sistemas con un solo grado de libertad para simplificar considerablemente los cálculos matemáticos. Un ejemplo de un sistema de un grado de libertad puede ser una viga sometida a flexión, mostrada a continuación. En esta ilustración el grado de libertad es el movimiento en el sentido vertical o “y”.(Umss 2012)

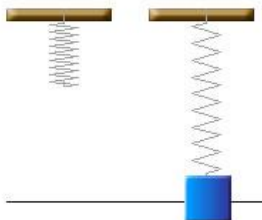
Ilustración 25: Viga simplemente apoyada con una carga puntual en el centro



b. **Vibración libre no amortiguada:** El objetivo de este inciso es llegar a obtener una función para el desplazamiento de una estructura o de cualquier objeto en general con un grado de libertad, en un sistema oscilatorio o recurrente y sin amortiguamiento. Esta función se ampliará luego para los sistemas amortiguados y de esta forma determinar y predecir comportamientos en estructuras más complejas. (Umss 2012)

Como modelo matemático se tomará el sistema siguiente el cual consta de una masa sostenida por un resorte:

Ilustración 26: Ejemplificación de vibración libre no amortiguada



Este es un caso sencillo en el cual se va a despreciar cualquier fuerza externa al sistema propio. Únicamente se tomará para el análisis el peso propio de la masa “m” y la fuerza interna desarrollada por el resorte la cual es “kx”. (Umss 2012)

Como acto seguido se desarrolla un Diagrama de Cuerpo Libre, el cual resulta muy sencillo para este caso como el siguiente:

Ilustración 27: DCL para el sistema propuesto

$F_r = kx$



$P = mg$

De esta forma obtenemos el peso propio de la masa ($P = mg$) y la fuerza interna desarrollada por el resorte ($F_r = kx$), siendo “k” la rigidez del resorte. Haciendo sumatoria de fuerzas en el eje “y” tenemos lo siguiente:

$$\Sigma F_y = 0; kx - mg = 0 \quad \text{B-1}$$

Sin embargo para este análisis no se considerará la gravedad sino una aceleración aleatoria, de tal forma que la ecuación 1 queda así,

$$\Sigma F_y = 0; kx = ma \quad \text{B-2}$$

La ecuación anterior es una ecuación diferencial de segundo orden la cual posee dos soluciones alternativas:

$$kx = m \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} \quad \text{B-3}$$

Solución 1: $x_1 = A \cos(\omega t)$

Solución 2: $x_2 = B \sin(\omega t)$

Si reemplazamos la solución 1 en la ecuación 3 y luego despejamos para “ ω ” entonces obtendremos el siguiente valor:

$$k(A \cos \omega t) + m(A \omega^2 \cos \omega t) = 0 \quad \text{B-4}$$

$$(A \cos \omega t)(k + m \omega^2) = 0 \quad \text{B-5}$$

Si la primera parte de la ecuación la igualamos a 0 para satisfacerla, entonces tendremos lo siguiente:

$$(k + m\omega^2) = 0 \quad \text{B-6}$$

$$-k/m = \omega^2 \quad \text{B-7}$$

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad \text{B-8}$$

Esta es la definición de la frecuencia natural del sistema. Las dos soluciones encontradas para la ecuación diferencial de la ecuación 3 pueden sumarse para formar una tercera solución ya que se trata de una ecuación diferencial lineal. (Umss 2012)

Solución 3: $x_3 = A\cos(\omega t) + B\sin(\omega t)$

La derivada de esta ecuación nos da la función velocidad del sistema

$$\dot{x}_3 = v = -A\omega\sin(\omega t) + B\omega\cos(\omega t) \quad \text{B-9}$$

A y B son constantes que dependen de las condiciones iniciales, por lo tanto si proponemos x_0 como desplazamiento de la masa en $t=0$ y v_0 de igual forma, obtendremos que $B = x_0$, y $A = v_0/\omega$. De tal forma que la solución 3 queda así:

$$x = \frac{v_0}{\omega}\cos(\omega t) + x_0\sin(\omega t) \quad \text{B-10}$$

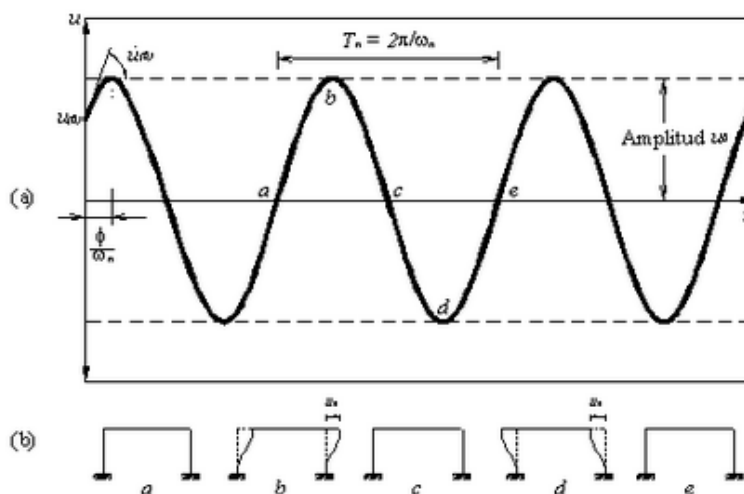
La ecuación 10 es una función periódica armónica por lo tanto tiene un periodo recurrente y una frecuencia natural (definida anteriormente).

El periodo T se define como la inversa de la frecuencia considerando 2π como un ciclo, por lo tanto:

$$T = \frac{1}{f}; f = \frac{\omega}{2\pi} \quad \text{B-11}$$

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \quad \text{B-12}$$

Ilustración 28: Modelación de sistema de vibración no amortiguado



Fuente: Umss. Vibración Libre. 2003

En la representación gráfica anterior se muestra la modelación de un sistema de vibración libre no amortiguado. Mientras el tiempo corre, el desplazamiento lateral continúa de la misma forma sin aumentar ni disminuir. A esto también se le llama movimiento periódico o perpetuo. El ejemplo es para un marco a momento sencillo, sin embargo la misma grafica aplicaría a un edificio. (Umss 2012)

c. Vibración libre amortiguada: El caso anterior no es válido en la realidad ya que cualquier sistema, aunque no tenga un amortiguamiento deseado o incluido con la finalidad de disminuir desplazamientos, posee cierto grado de amortiguación. Es por eso que es de gran importancia estudiar los sistemas amortiguados. (Umss 2012)

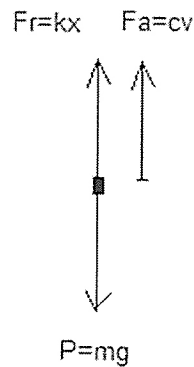
Para simplicidad tomaremos el sistema anterior de una masa y un resorte el cual consta de un amortiguamiento de tipo viscoso (ver definición en parte D). Por lo tanto se define la fuerza de amortiguamiento como:

$$F_a = c\dot{x}$$

B-13

Y entonces tendremos un nuevo diagrama de cuerpo libre y una nueva sumatoria de fuerzas en "y" (es importante indicar que F_a se opone al movimiento, es por esto que tiende a llevar el sistema al reposo, F_a disminuye mientras la velocidad disminuye): (Umss 2012)

Ilustración 29: DCL para el mismo sistema



$$kx + c\dot{x} = -m\ddot{x} \quad \text{B-14}$$

$$kx + c\dot{x} + m\ddot{x} = 0 \quad \text{B-15}$$

Esta ecuación diferencial tiene soluciones de la forma:

$$x = e^{\lambda t} \quad \text{B-16}$$

Por lo tanto si la sustituimos en la ecuación 15 derivando obtendremos lo siguiente:

$$m\lambda^2 e^{\lambda t} + c\lambda e^{\lambda t} + ke^{\lambda t} = 0 \quad \text{B-17}$$

$$e^{\lambda t}(m\lambda^2 + c\lambda + k) = 0 \quad \text{B-18}$$

Como $e^{\lambda t}$ nunca es cero, entonces:

$$(m\lambda^2 + c\lambda + k) = 0 \quad \text{B-19}$$

Tenemos ahora una ecuación cuadrática cuyas soluciones son las presentadas a continuación:

$$\lambda_1 = -\frac{c}{2m} + \sqrt{\left(\frac{c}{2m}\right)^2 - \frac{k}{m}} \quad \text{B-20}$$

$$\lambda_2 = -\frac{c}{2m} - \sqrt{\left(\frac{c}{2m}\right)^2 - \frac{k}{m}} \quad \text{B-21}$$

En las ecuaciones 20 y 21, cuando el valor dentro de la raíz se vuelve 0 entonces se dice que el amortiguamiento es crítico (C_c), esto es de la siguiente forma:

$$\left(\frac{C_c}{2m}\right)^2 - \frac{k}{m} = 0 \quad \text{B-22}$$

$$C_c = 2m\sqrt{\frac{k}{m}} = 2m\omega_n \quad \text{B-23}$$

De esta cuenta tendremos tres posibles soluciones para la ecuación cuadrática. Cuando C es mayor que C_c , cuando es menor y cuando es igual.

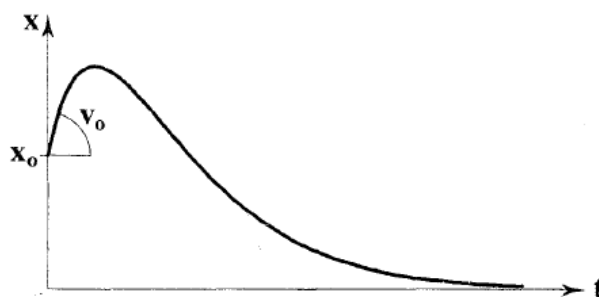
1. Cuando $C > C_c$ (Sobre-amortiguación):

En este caso podemos ver que en la ecuaciones 20 y 21 la raíz es positiva, por consiguiente tendremos soluciones reales y los cálculos operativos se simplifican. (Umss 2012)

Siguiendo el principio de la ecuación B-16, la solución de la ecuación diferencial, siendo a la vez la ecuación de posición, está dada por:

$$x(t) = Ae^{\lambda_1 t} + B^{\lambda_2 t} \quad \text{B-24}$$

Ilustración 30: Curva de desplazamiento vs. tiempo para un sistema críticamente amortiguado



Es muy importante identificar que en este caso no estamos frente a un movimiento oscilatorio, la estructura o sistema sobre-amortiguado tiende a su posición original exponencialmente. La gráfica anterior muestra el caso para un sistema críticamente amortiguado, para el caso sobre-amortiguado la posición tiende a llegar a cero más rápidamente. (Umss 2012)

2. Cuando $C = C_c$ (Críticamente amortiguado):

Este es un caso similar al visto anteriormente ya que la solución sigue dando números reales con la diferencia que la ecuación cuadrática ahora tiene únicamente una solución, por lo tanto tenemos lo siguiente:

$$x(t) = Ce^{\lambda t} \quad \text{B-25}$$

3. Cuando $C < C_c$ (Sub-amortiguación):

Este es el caso en donde las soluciones no son tan sencillas ya que se deben incorporar número complejos ya que tendremos raíces negativas. Este caso es el más

común en sistemas estructurales y en general de cualquier naturaleza porque en la realidad nunca se encuentra una rigidez "ideal". (García, L. 1998)

Para la solución de la ecuación diferencial original se utilizan las ecuaciones de Euler:

$$e^{ix} = \cos x + i \operatorname{sen} x \quad \text{B-26}$$

$$e^{-ix} = \cos x - i \operatorname{sen} x \quad \text{B-27}$$

Siendo $i = \sqrt{-1}$.

La solución general es de la forma siguiente:

$$x = D[e^{-(c/2m)t} \operatorname{sen}(\omega_d t + \phi)] \quad \text{B-28}$$

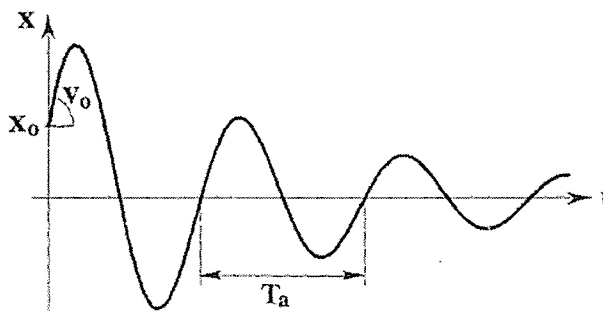
En donde ω_d es la frecuencia natural amortiguada:

$$\omega_d = \sqrt{\frac{k}{m} - \left(\frac{c}{2m}\right)^2} = \omega_n \sqrt{1 - \left(\frac{c}{c_c}\right)^2} \quad \text{B-29}$$

Por consiguiente el periodo de vibración amortiguada es:

$$\tau_d = \frac{2\pi}{\omega_d} \quad \text{B-30}$$

Ilustración 31: Curva de desplazamiento vs. Tiempo para un sistema sub-amortiguado



En este caso sí observaremos un movimiento oscilatorio con una frecuencia natural amortiguada y un periodo de oscilación amortiguado como definidos anteriormente. (García, L. 1998)

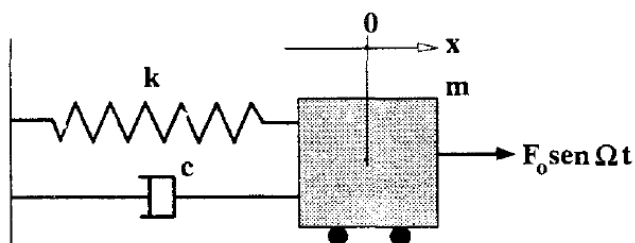
Al recordar la gráfica del sistema de vibración libre no amortiguada se puede notar que a diferencia, esta ya no representa un movimiento perpetuo ni periódico. Es una curva que a través del tiempo, el desplazamiento o derivas (en el caso de una estructura vertical) van decreciendo hasta llegar a 0. Entonces en este caso se observa un ejemplo real y éste es el tema central de la presente investigación.

El reto de este trabajo es buscar un sistema que le agregue amortiguación al sistema estructural (ya que cualquier sistema estructural posee amortiguación inherente) con la finalidad de disminuir los desplazamientos laterales.

d. Vibración forzada amortiguada: Hasta ahora hemos visto únicamente sistemas sometidos a fuerzas no constantes en el tiempo. Sin embargo, en muchos casos, las estructuras están sometidas a distintas fuerzas que sí constantes y a la vez son de tipo oscilatorias tales como vibraciones provocadas por maquinaria. Aunque este caso no será el punto central de este trabajo de investigación será descrito brevemente. (García, L. 1998)

Esta fuerza constante y periódica está dada por la función $F_0 \text{sen} \Omega t$; siendo Ω la frecuencia natural de la fuerza, la cual no tiene que ser necesariamente igual a la del sistema, y F_0 es la fuerza máxima. (García, L. 1998)

Ilustración 32: DCL para una vibración forzada amortiguada



Si se hace sumatoria de las fuerzas horizontales se tendrá la siguiente ecuación:

$$m\ddot{a} + c\dot{x} + kx = F_0 \text{sen} \Omega t \quad \text{B-31}$$

Esta ecuación tiene dos soluciones, una homogénea y una particular. La solución homogénea para diversos coeficientes de amortiguamiento está dada en lo visto anteriormente. La solución particular será de la forma siguiente: (García, L. 1998)

$$x = X \text{sen}(\Omega t - \phi) \quad \text{B-32}$$

En donde:

X = Amplitud de la ecuación de movimiento.

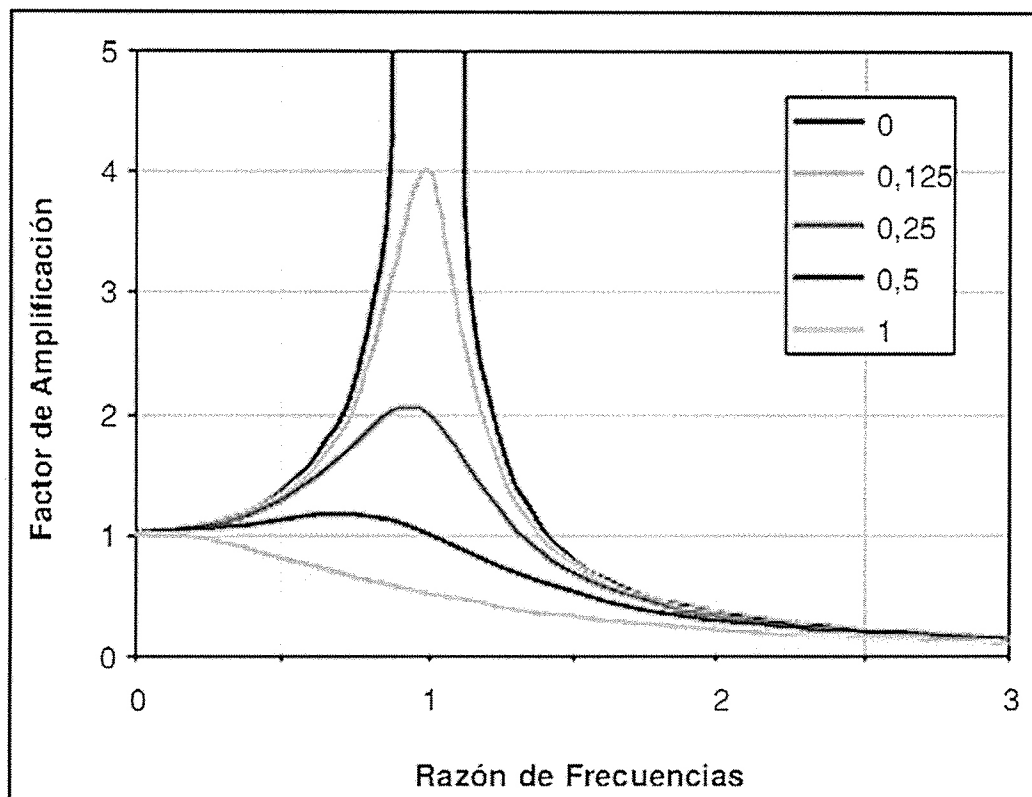
Φ = Desfase de la oscilación incidente con la oscilación resultante.

$$\frac{x}{F_0/k} = \frac{1}{\sqrt{[1-(\frac{\Omega}{\omega_d})^2]^2 + [2(\frac{c}{c_c})(\frac{\Omega}{\omega_d})]^2}}$$

B-33

Al graficar esta ecuación podemos notar que el factor de amplificación está regido por dos parámetros básicamente: la razón entre frecuencias (del sistema y de la fuerza periódica) y la razón entre el amortiguamiento del sistema y el crítico. Si las frecuencias están sintonizadas, es decir, si la relación entre ellas es cercana o igual a 1 entonces la amplificación aumentará. Asimismo si se tiene una razón alta de amortiguamiento es decir, si el sistema es críticamente o sobre-amortiguado la amplificación será reducida considerablemente, al contrario si es un sistema con poco amortiguamiento esta aumentará. (García, L. 1998)

Ilustración 33: Curvas de amplificación vs razón de frecuencias para varios sistemas de amortiguación



C. Sistemas de control estructural

1. **Introducción.** Como ya se vio anteriormente, toda estructura posee inherentemente cierta amortiguación, la cual en muchos de los casos es capaz por si misma de disipar correctamente fuerzas externas de sismo o viento. Sin embargo, en muchos otros casos es necesario agregar algún tipo de amortiguamiento adicional para contrarrestar las derivas. Para esto existen amortiguadores de diversa naturaleza los cuales serán definidos y desarrollados con casos prácticos y ejemplos de dispositivos que son utilizados actualmente en varios edificios alrededor del mundo.

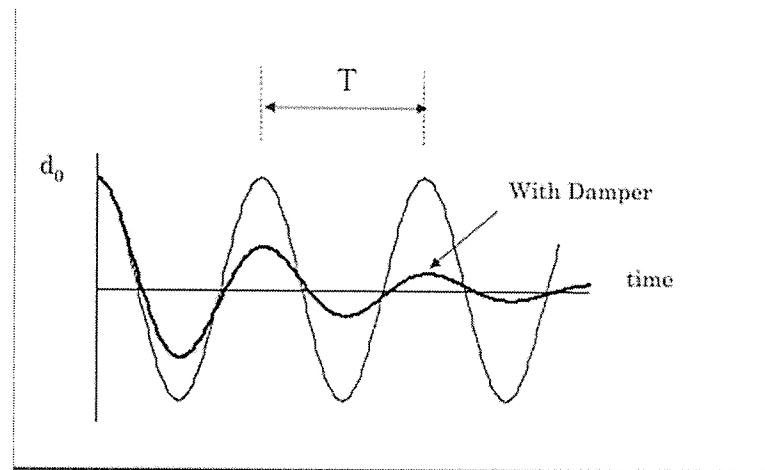
2. **Dispositivo de control pasivo.** El control pasivo se da por la naturaleza misma de cada dispositivo. Es decir, el dispositivo mismo no necesita de una fuerza constante que la haga funcionar. El mismo se activa por naturaleza únicamente cuando existe un movimiento provocado por una fuerza externa.

En los últimos años estos dispositivos han sido utilizados por más de 700 estructuras, en varios países tales como Estados Unidos, Japón, Nueva Zelanda, Canadá y China. (Crisafulli, F. 2008)

a. **Aisladores de base.** La idea principal radica en la protección de las edificaciones de la acción destructiva utilizando un apoyo que lo desacople del terreno donde se encuentra. Durante el último siglo se han inventado y estudiado diversos mecanismos para lograr este resultado.

El concepto de aislación de base consiste en separar la estructura del edificio de los movimientos horizontales del suelo colocando elementos entre el suelo y la estructura con el fin de disminuir la rigidez lateral. Esto hace que la frecuencia fundamental de oscilación de la estructura se vea disminuida.

Ilustración 34: Frecuencia de oscilación disminuida por un sistema de aislación de base.



Es importante tomar en cuenta que en el momento que se efectúa la aislación de base, se limita la energía en el sistema durante el sismo. Por lo tanto estos dispositivos actúan también soportando la carga vertical transmitiéndola hacia la base y devolviendo al edificio a su posición natural después de un sismo.

Actualmente esta técnica es una opción muy bien aceptada en las regiones sísmicas del mundo, estas ideas han sido primitivas y al mismo tiempo innovadoras para recurrir a una nueva estrategia de diseño estructural y sismo resistente. Se propone la utilización de rodillos, capas de arena o materiales de caucho o goma para permitir al edificio que se desacople y exista un deslizamiento.

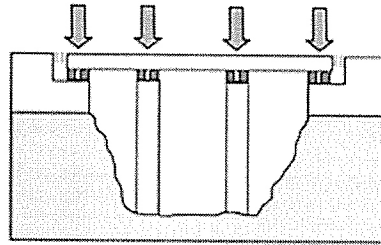
Para la utilización de estos dispositivos se requiere:

1. Aislar el edificio del terreno natural.
2. Soportar el peso del edificio con los apoyos de base.
3. Amortiguar la amplitud de vibración del edificio.
4. Regresar la edificación a la forma original luego de transcurrido el sismo.

Así mismo, se consideran 4 funciones principales:

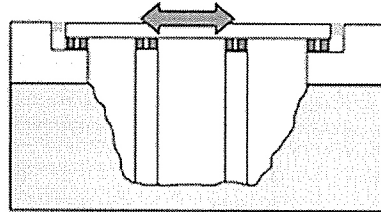
1. Transmisión de carga vertical.

Ilustración 35: Vertical. Habib Saeed Monir, H. N. (2011).



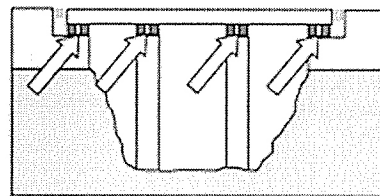
2. Que permita el desplazamiento y flexibilidad en el plano horizontal.

Ilustración 36: Desplazamiento y flexibilidad del plano horizontal. Habib Saeed Monir, H. N. (2011).



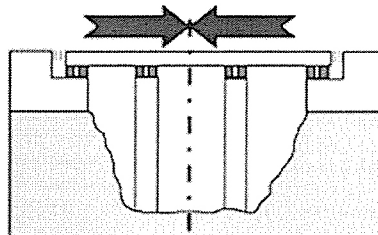
3. Que sea capaz de disipar cantidades substanciales de energía.

Ilustración 37: Disipación de energía. (Habib Saeed Monir, H. N. , 2011).



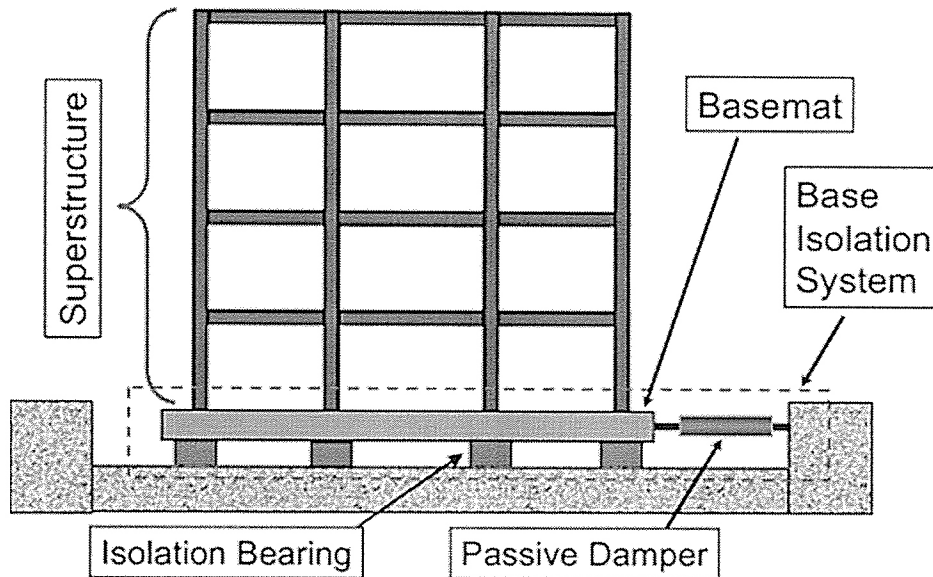
4. Que asegure en re posicionamiento de la estructural al lugar de origen.

Ilustración 38: Reposicionamiento de la estructura. (Habib Saeed Monir, H. N., 2011).



La siguiente figura muestra de una forma general una estructura con un sistema de aislación de base:

Ilustración 39: Estructura con un sistema de aislación de base y amortiguador.
Habib Saeed Monir, H. N. (2011).

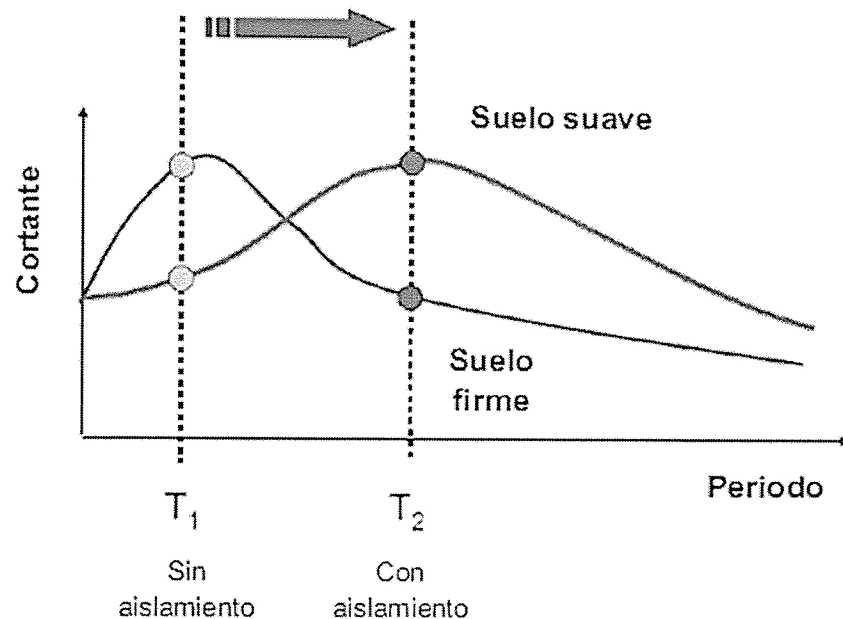


Se considera dos restricciones importantes para utilizar un sistema de aislación de base en una estructura:

La primera restricción es la cantidad de niveles debido a que el periodo de vibración aumenta respecto al número de pisos. La segunda restricción es que no se aconseja utilizar aislamiento de base en suelos tipo IV o peores, ya que los suelos con estas características pueden filtrar las altas frecuencias generadas por el sismo y generar frecuencias que produzcan periodos largos de duración.

En la siguiente figura se ilustra la respuesta del suelo suave y firme tanto con aisladores y sin aisladores de base, donde las estructuras flexibles estarían sometidas a mayores fuerzas cortantes en el caso de suelos suaves.

Ilustración 40: respuesta del suelo con aisladores y sin aisladores de base.



Se consideran dos tipos básicos de sistemas de aislación de base:

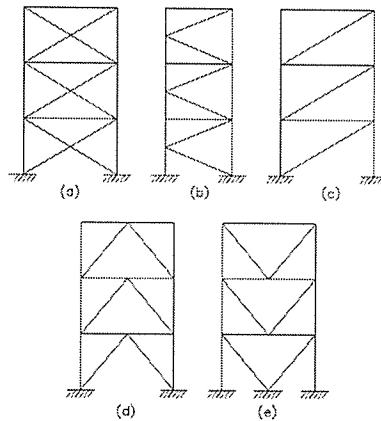
b. Disipadores de energía.

1) **Amortiguadores metálicos de fluencia.** La Ingeniería Civil y en específico la estructural ha tenido en las últimas décadas un gran avance en cuanto al descubrimiento de la capacidad de los elementos metálicos. En un principio se diseñaba para la capacidad de los elementos en el rango lineal únicamente, hasta que se descubrió el límite de fluencia y el rango inelástico. Esto abrió las puertas en cuanto a la optimización del diseño. (Crisafulli, F. 2008)

a) *Arriostramientos de acero.* En la Ingeniería Estructural de acero hay muchos marcos de edificaciones que funcionan sin rigidizantes o disipadores de energía; estos son llamados marcos a momento. Sin embargo, se ha descubierto, a través de los avances en el conocimiento del diseño sismo resistente que los marcos arriostrados funcionan muy bien para contrarrestar los ataques sísmicos.

Por un lado existen los marcos arriostrados concéntricamente, estos poseen riostras las cuales están ubicadas en formas triangulares dentro de los marcos. Existen varias configuraciones y cada una dará resultados levemente diferentes. A continuación se presentan algunos casos de configuraciones posibles: (Crisafulli, F. 2008)

Ilustración 41: Diseño sismo resistente de construcciones de acero

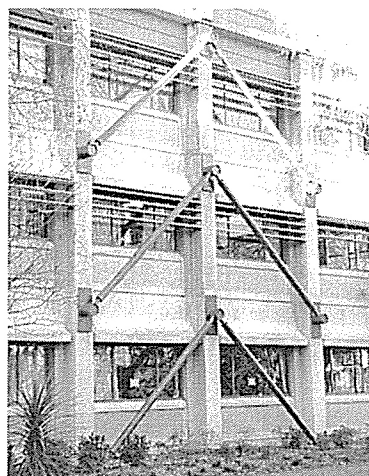


Este tipo de sistema genera en las riostras esfuerzos de compresión y tensión, para lo cual están diseñadas. La carga lateral se transmite a ellas de forma axial salvaguardando las vigas y las columnas para esfuerzos principalmente gravitacionales.

Algunos arquitectos se han opuesto a este tipo de solución estructural ya que eliminan posibles ventanas y dan lugar a obstáculos visuales y en algunos casos obstáculos físicos (colocación de balcones etc.). Aun así, otros más han logrado tomar ventaja de estos dispositivos para elaborar un diseño arquitectónico más moderno.

Uno de los éxitos más grandes de este sistema ha sido la contribución que ha dejado para la rehabilitación de edificios que han sido dañados por cargas de sismo o viento. (Crisafulli, F. 2008)

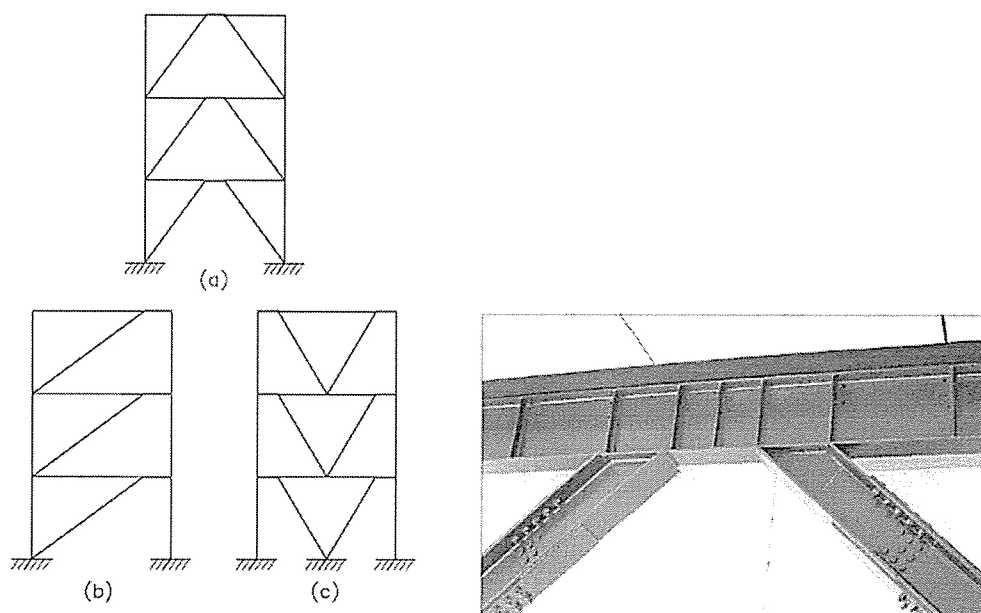
Ilustración 42: Rehabilitación de un edificio de concreto con arriostramientos concéntricos



Los marcos a momento han mostrado un buen desempeño en cuanto a la flexibilidad y su alta capacidad de ductilidad mientras que los marcos arriostrados concéntricamente muestran una mayor rigidez, los cuales trabajan en el rango elástico. El problema que han mostrado estos últimos, es que como las riostras se someten a compresión, el estado límite es el pandeo, siendo esto un impedimento para el aprovechamiento de la ductilidad. (Crisafulli, F. 2008)

Es por esto que en 1970 en Japón, desarrollaron un sistema que combina las fortalezas de estos dos tipos de marcos: marcos arriostrados excéntricamente. Estos marcos poseen riostras al igual que los arriostrados concéntricamente, a diferencia que dejan un “enlace” o “link” en inglés, quien es el responsable de absorber los esfuerzos de flexión y de corte disipando energía para luego distribuir los esfuerzos a las riostras quienes trabajarán en el rango lineal elástico. (Crisafulli, F. 2008)

Ilustración 43: Marcos arriostrados excéntricamente



Fuente: “Diseño sísmoresistente de construcciones de acero” Ing. Javier Crisafulli, Ph. D. Universidad Nacional de Cuyo, Mendoza Argentina.

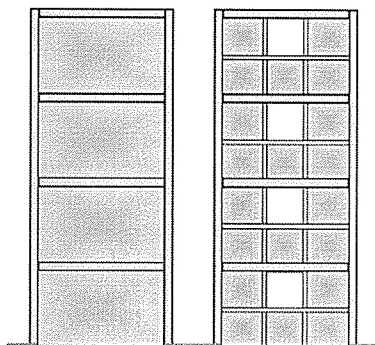
Es altamente recomendable que el enlace esté incluido en las vigas y no en las columnas, ya que este tendrá los mayores esfuerzos y no es preferible que falle una viga que una columna; aunque de cualquier forma, una falla de este tipo es crítica. (Crisafulli, F. 2008)

b) *Muros de corte con placas de acero.* Las placas de acero utilizadas para la disipación de energía han sido utilizadas desde hace varias décadas, pero fue hasta en el año 2005 que fue incluida la especificación de uso en el American Institute of Steel Construction, AISC 341-05.

Este sistema funciona colocando las placas dentro de los marcos teniendo regularmente como elementos de borde vigas y columnas. Las placas de acero trabajarán en el rango inelástico aprovechando al 100% su capacidad de fluencia. El principal estado límite es el pandeo lateral. (Crisafulli, F. 2008)

Los esfuerzos de compresión y tensión ocurren a 45 grados de las placas mientras que el pandeo ocurre perpendicularmente a las mismas, saliendo del plano de placa.

Ilustración 44: Placas de acero como muros de corte

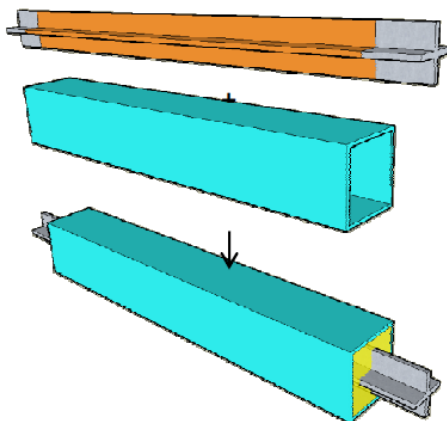


Fuente: "Diseño sísmoresistente de construcciones de acero" Ing. Javier Crisafulli, Ph. D. Universidad Nacional de Cuyo, Mendoza Argentina.

c) *Barras de pandeo restringido.* En 1988, fueron descubiertas en Japón por Wada y Nakashima las barras de pandeo restringido. Ante el inconveniente del pandeo generado en las riostras convencionales de los marcos concéntricos. Se planteó esta nueva solución la cual restringe a la barra de pandeo de tal forma que tenga capacidad de llegar y sobre pasar su límite de fluencia.

Las riostras de acero se recubren con un líquido antideslizante y adherente, luego se introducen en un tubo y este es rellenado como concreto tipo grout. (Crisafulli, F. 2008)

Ilustración 45: Barras de pandeo restringido



Fuente: “Diseño sísmoresistente de construcciones de acero” Ing. Javier Crisafulli, Ph. D.
Universidad Nacional de Cuyo, Mendoza Argentina.

Como conclusión de las riostras de cualquier tipo podemos decir que son elementos estructurales fáciles de reemplazar, si estos fueran dañados, y que son sometidos a cargas de tracción y compresión sacrificándose literalmente a ser dañados antes que los elementos principales tales como vigas y columnas. Estos son análogos a los fusibles en la ingeniería eléctrica, los cuales están fabricados para quemarse antes que el daño llegue al dispositivo. (Crisafulli, F. 2008)

2) Amortiguadores de rozamiento. Los amortiguadores por rozamiento funcionan a través de fricción entre elementos estructurales. Esto ha funcionado bastante bien en la mecánica automotriz, para el frenado de los vehículos. Últimamente se han ejecutado numerosas estructuras con este sistema, en específico en Canadá y en Asia. El sistema consiste en la implementación de diagonales de acero excéntricas las cuales constan de sujetadores axiales graduales para regular la fuerza de rozamiento. Sin embargo, conviene entrar en detalle en cuanto a la esbeltez de los elementos y estados límites en el rango inelástico. (Crisafulli, F. 2008)

3) Amortiguadores visco elásticos. Los amortiguadores viscosos y los amortiguadores visco elásticos son clasificados como mecanismos de amortiguamiento viscoso. Estos amortiguadores utilizan materiales viscosos o visco elásticos. Los amortiguadores viscosos utilizan la resistencia viscosa, el cual opera como una función de la velocidad. Los amortiguadores visco elásticos aprovecha la deformación de corte de materiales basados en polímeros altamente disipativos.

Estos sistemas pueden funcionar para niveles de vibración muy pequeños comparados con los mecanismos de histéresis. El efecto de amortiguamiento por unidad de volumen del dispositivo es limitado y por ello, estos amortiguadores deben ser grandes para compensar. Las funciones de los mecanismos de amortiguamiento viscoso son también afectados por factores como la temperatura y la velocidad de vibración. Durante el diseño de los amortiguadores se debe investigar la capacidad de deformación y amortiguamiento de estos, bajo condiciones de temperatura locales. Debido a que la temperatura de los materiales viscosos y visco elásticos se elevan bajo repetidos ciclos de carga, los efectos de amortiguamiento descienden, es por ello que pueden ser necesario la utilización de placas de acero con gran capacidad térmica u otras medidas de resistencia al calor en el dispositivo.

Los mecanismos de amortiguamiento viscoso requieren mantenimiento, tales como cambios de aceite de los amortiguadores de aceite, para prevenir la deterioración. A continuación se describen distintos dispositivos de amortiguamiento viscoso que están en el mercado con algunos ejemplos de aplicación real.

a) *Amortiguador de Aceite de Alto Rendimiento.* El amortiguador de aceite de alto rendimiento, denominado HiDAM, es otro tipo de dispositivo producido por la empresa japonesa Kajima Corporation. Este dispositivo de control sísmico de tipo pasivo es un mecanismo de amortiguamiento viscoso. El amortiguador puede ser instalado entre la parte superior del arriostramiento y las vigas. El dispositivo encierra aceite en ambos lados de un pistón. La eficiencia del amortiguamiento es lograda por el movimiento relativo del pistón y la resistencia del aceite que pasa por las válvulas de control de presión que conectan ambas cámaras de aceite de manera que genera una gran fuerza de amortiguamiento por un pequeño golpe del pistón. El dispositivo es conectado al arriostramiento por medio del anillo de horquilla fijado en el extremo de la barra y el cilindro.

En cuanto al costo del dispositivo, la empresa calcula que razón de costo dispositivo/edificio es entre un 0.5 y 1.5 % y que el ahorro en costo estructural obtenido de aplicaciones reales es entre un 1 - 3%. Aunque el dispositivo HiDAM ya fue instalado en edificios reales, se introduce aquí un ejemplo de aplicación del HiDAM a un edificio alto hipotético. El edificio expuesto es aproximadamente de 100 m de alto con 25 pisos construido de acero estructural. Los arriostramiento son ordenados como se

muestran en la planta, y los dispositivos son instalados entre la parte superior del arriostramiento y las vigas. Contra las perturbaciones externas, se aprovecha el desplazamiento relativo entre los arriostramientos y las vigas, el dispositivo produce un efecto de amortiguamiento significativo que resulta en una reducción de las vibraciones del edificio.

Las respuestas del edificio con este sistema son analizadas bajo los terremotos de El Centro y Tokachioki . A continuación se muestra el resultado del análisis donde se observa que la fuerza de corte de diseño convencional del edificio expuesto es mayor que la fuerza de corte que inducen los terremotos cuando se introducen los dispositivos HiDAM. (Aviles 2001)

b) Diagrama 5: Amortiguador de aceite de alto rendimiento. Como aplicación real se encuentra un edificio ubicado en la ciudad de Atsugi de la prefectura de Kanagawa, Japón de 26 pisos y de 57119 m² se instalaron 80 dispositivos HiDAM localizados entre el 1ero y el 16avo piso. Estos amortiguadores son ubicados lejos del centro de masa del edificio para controlar los efectos torsionales. Los dispositivos son de 1.70 m de largo, 0.340 m de diámetro y con un peso aproximado de 0.8 toneladas y un recorrido máximo de ± 6 cm desde el punto neutral.

Como fue previsto por los diseñadores, los HiDAM reducen en general el corte basal de diseño en un 30% y el debido al viento en alrededor del 40%, relativo al diseño convencional. Todo lo cual trajo consigo una notable reducción del volumen de los miembros estructurales.

c) Amortiguador viscoso de Taylor. Este tipo de amortiguador viscoso es diseñado, fabricado y distribuido por la empresa Taylor Devices, Inc., de New York. Al dispositivo se le asigna el nombre de Taylor Fluid Viscous Dampers y posee prácticamente las mismas características del amortiguador HiDAM. La carga fuerza al pistón a comprimir al fluido viscoso de la sección central, el cual a la vez fuerza al fluido a entrar a la primera sección, el que absorbe e iguala la fuerza de la carga entrante. Entonces, en cuestión de milisegundos, el fluido es forzado a ingresar a la tercera sección para prevenir que el pistón regrese bruscamente.

Los amortiguadores TFVD se pueden instalar tanto en edificios nuevos como también en edificios existentes, aun estando ocupados. Estos amortiguadores son

ideales para proteger edificios altos y torres contra los efectos de fuertes vientos. Para la protección frente a terremotos son eficientes solo si la construcción no es muy alta.

Como ejemplos reales de aplicación de este dispositivo se tiene el Centro Médico San Bernardino. Posee 5 edificios y un área de piso de 84000 m². Está localizado en una alta zona sísmica al este de Los Ángeles, California. Todo el Centro Médico en un principio poseía una aislación basal de apoyos de goma de alto amortiguamiento, pero su deflexión fue inaceptable, con un rango de ± 1500 mm. Y luego de aplicarle los amortiguadores viscosos como se muestra en las Figuras 2.37 y 2.38, el desplazamiento de base fue reducido a ± 560 mm. Un total de 186 amortiguadores fueron ocupados en el proyecto. En la Tabla a continuación se pueden ver las especificaciones de los amortiguadores utilizados en este edificio. (Aviles 2001)

d) *Amortiguador visco elástico 3M.* El amortiguador de corte visco elástico (VE), comprende dos o más capas de material con una configuración tipo sandwich como se muestra en la Fig. 2.43. Generalmente, son introducidos en los arriostramientos de diagonales simples. En la Fig. 2.44 se muestra una instalación típica del amortiguador. El material usado en los amortiguadores son polímeros altamente disipativos que tienen un comportamiento visco elástico. El más utilizado corresponde a una clase de copolímero de acrílico que ha sido desarrollado por la empresa estadounidense 3MCo. (Minnesota Mining and Manufacturing (3M) Company). Este es uno de los cuatro tipos de polímeros altamente disipativos, que se encuentran generalmente disponibles en 3M. Los materiales tienen características dinámicas estables, son químicamente inerte, y poseen buenas propiedades de envejecimiento. Además, son resistentes a los contaminantes ambientales. El comportamiento del material VE es influenciado por tres propiedades portantes. Estas son el módulo de pérdida de corte, el módulo de almacenamiento de corte y su razón, que es el factor de pérdida de corte. Estas propiedades son sensibles a la frecuencia de excitación, cambios de temperatura y al nivel de tensión de deformación, siendo la relación general la misma para todos los materiales. Así, una relación general puede ser usada para predecir las propiedades de los cuatro materiales. Esto es la base de los esquemas de propiedades del material desarrollado por el fabricante.

Este tipo de amortiguador aprovecha el desplazamiento relativo entre el arriostramiento y la viga para disipar la energía de vibración y de esta forma reducir el

movimiento de respuesta de la estructura. Los amortiguadores visco elásticos exhiben curvas de histéresis elípticas, típicas de materiales con propiedades que dependen de la velocidad. Tales curvas son de forma regular y muestran un comportamiento estable.

Estos amortiguadores no tienen un nivel de fuerza de activación, como por ejemplo lo tienen los dispositivos de fricción. De esta manera disipan energía para todos los niveles de excitación sísmica. Como se dijo anteriormente, las características de rigidez de los amortiguadores VE son dependientes de factores tales como, la amplitud de la tensión, frecuencia y temperatura. Así, a bajas frecuencias el material visco elástico fluye sin disipar energía o proveer rigidez; para frecuencias medias es altamente disipativo; y para frecuencias grandes se comporta como un material elástico con una disipación pequeña. Los amortiguadores visco elásticos han mejorado la solución al problema de las vibraciones producto de la acción del viento en edificios de gran altura y han permitido aumentar el amortiguamiento de las estructuras, prueba de ello es el prolongado buen comportamiento de estructuras altas en que se han incluido. (Aviles 2001)

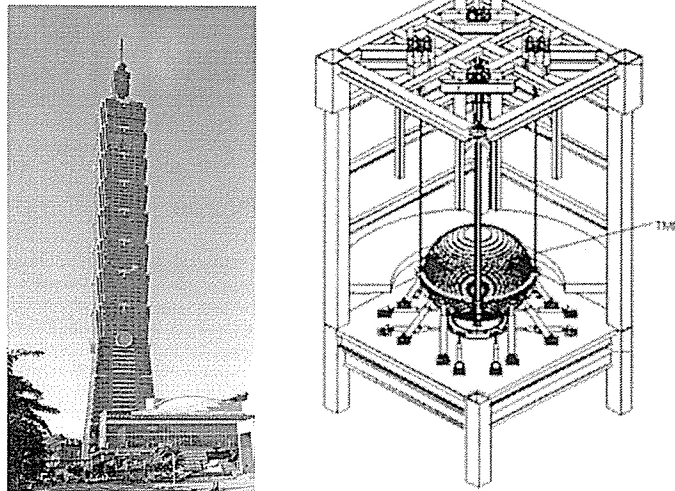
El primero y más notable ejemplo en que se han utilizado amortiguadores viscoelásticos 3M lo constituyen las torres gemelas en New York, el World Trade, en el cual se instalaron los dispositivos en el año 1969. El diseño de los dispositivos fue hecho para reducir las vibraciones inducidas por el viento a niveles que fueran imperceptibles para las personas que se encontraran en su interior. En estas torres fueron instalados cerca de 10000 amortiguadores, puestos en el perímetro de cada edificio y localizados en la parte inferior del entramado del sistema de piso, desde el piso N°10 al N°110. Las pequeñas deformaciones en los amortiguadores producto del movimiento de la estructura por acción del viento, es suficientemente necesaria como para aumentar el amortiguamiento natural de la estructura. Las torres ya han experimentado tanto vientos moderados como fuertes tormentas y su comportamiento fue muy similar al estimado en su diseño. (Aviles 2001)

4) Amortiguadores de masa sintonizados. Los amortiguadores de masa sintonizados regularmente son utilizados en edificios que ya han sido construidos y se requiere minimizar las derivas, ya sea por seguridad sísmica o de viento o ya sea por tema de servicio y comodidad. Las variables a

tomar en cuenta cuando se requiere diseñar e implementar este dispositivo son: la masa, la rigidez del elemento y la frecuencia de oscilación. Es importante tomar en cuenta esto para estimar la razón de la masa del sistema con la del edificio, la frecuencia de la masa con la frecuencia natural del sistema, y el coeficiente de amortiguamiento de la masa con el de la estructura. Es importante especificar que esta masa puede ser tanto de acero como de concreto. (Crisafulli, F. 2008)

El ejemplo más contundente hoy en día de la efectividad de los amortiguadores sintonizados de masa yace en el edificio Taipei 101, en Taipei, Taiwan. En la planta superior de la estructura de 508 metros de altura está ubicada la masa sostenida por un péndulo para generar la oscilación a la frecuencia del edificio. (Crisafulli, F. 2008)

Ilustración 46: Edificio Taipei 101



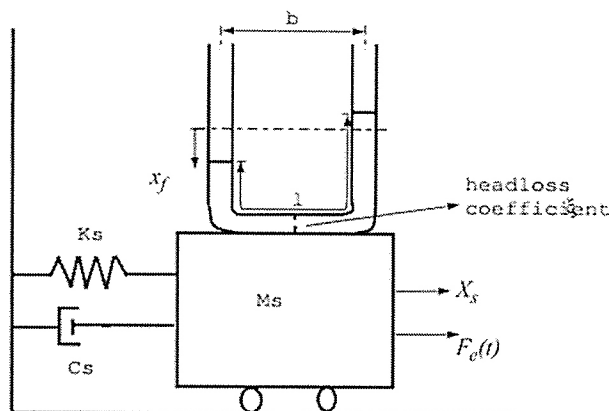
Fuente: "Applications of passive mass dampers for civil engineering structural control: a review", w. prachaseree.

c. Amortiguadores de líquido sintonizados

1) **Amortiguadores líquidos de columna sintonizados (ALCS).** Este tipo de amortiguadores es uno de los métodos más recientes para promover la reducción de vibraciones en edificios de mediana y gran altura. Los conceptos involucrados tienen que ver con la dinámica de fluidos y la física de fluidos, al igual que con el movimiento libre amortiguado. El sistema considera un solo grado de libertad, de esta forma se logra facilitar algunos cálculos en el comportamiento del dispositivo. (Oliazadeh, P. 2012)

El amortiguador es un tubo en forma de "U" de sección variable o constante (en la mayoría de los casos es constante) el cual trabaja a sección llena y tiene contacto con la atmósfera.

Ilustración 47: Ejemplificación de amortiguador de líquido de columna sintonizado



El sistema de amortiguamiento de columna de líquido sintonizado es un sistema pasivo cuyo principio de funcionamiento es análogo a la aceleración lineal de mecánica de fluidos sin embargo involucra un movimiento oscilatorio con un cierto periodo a una cierta frecuencia. Al intervenir la fuerza del sismo, el líquido en el dispositivo se acelera en dirección contraria al sismo creando un fuerza contra restante oscilatoria. (Oliazadeh, P. 2012)

Para diseñar el mismo, es necesario realizar algunos ajustes y obtener ciertas relaciones. La frecuencia natural del dispositivo debe ser exactamente igual a la del edificio para que funcione. Si esto no es así, no va a funcionar como debe o incluso hasta podría afectar aun más incrementando las derivas. En segundo lugar conviene calcular la razón de la masa del dispositivo con respecto a la del edificio, esta debe de estar entre 0.5% y 5%. Se estima que un valor mayor a este provocaría el hecho de volver a diseñar el edificio gravitacionalmente. Conviene también hacer la relación entre rigideces y coeficientes de amortiguamiento para encontrar valores cercanos al rango mencionado anteriormente. Por lo general estos parámetros quedan a criterio del ingeniero ya que actualmente no hay límites fundamentados matemáticamente.

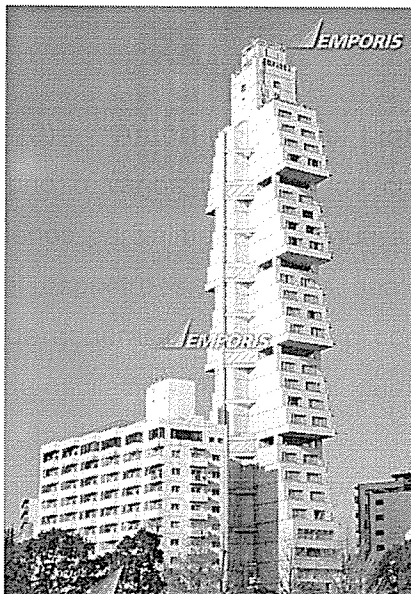
En la figura anteriormente mostrada se puede observar que en el tubo horizontal hay una pequeña válvula la cual trabaja pasivamente al igual que el resto del sistema. Esta válvula u orificio controla el movimiento oscilatorio por medio de una pérdida de

carga, de tal forma que el líquido no continúe moviéndose después del sismo sino que pare en cuanto el sismo lo haga. (Oliazadeh, P. 2012)

El análisis numérico no será detallado en esta sección ya que no fue el dispositivo que fue desarrollado en el presente trabajo.

a) *Aplicaciones actuales.* Japón es el país que ha tenido más desarrollo en la implementación de dispositivos nuevos para la reducción de vibraciones de viento y sismo. En Tokyo, el Hotel Cosima, cuenta con un dispositivo de amortiguamiento líquido de columna sintonizado, en su parte más alta. (Oliazadeh, P. 2012)

Ilustración 48: Hotel Cosima, Tokyo

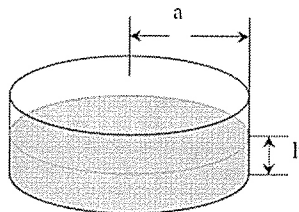


2) **Amortiguadores Líquidos Sintonizados (ALS).**

El ALS es un sistema de uno o varios tanques, los cuales pueden ser circulares, cuadrados o rectangulares llenos parcialmente de agua a fin de crear olas generadas por la aceleración lineal del espectro sísmico, las cuales son sintonizadas con la frecuencia del edificio a fin de generar un movimiento contrario al mismo pero con la misma frecuencia y periodo de oscilación. Además, al igual que el ALCS, la razón entre la masa de la estructura con la del dispositivo no debería de exceder el 5% para no generar cambios en la capacidad estructural a nivel gravitacional; la razón entre rigideces y coeficientes de amortiguamiento deben de tener un valor cercano o menor al

5%. Como se mencionó anteriormente, aquí es donde el criterio del ingeniero entra mucho en juego. (Ambrosini, D. 1999)

Ilustración 49: Análisis computacional de sistemas de control pasivo de vibraciones



Una de las mayores ventajas, además de ser un sistema pasivo es que no necesita energía eléctrica, asimismo en el caso de incendios se puede utilizar esta agua para apagar el fuego. Únicamente es necesario conectar tuberías a los tanques de agua. (Ambrosini, D. 1999)

a) *Análisis matemático.* A continuación se presentan las ecuaciones que describen el movimiento del agua en los tanques. Estos se basan en la teoría lineal de las olas. (Ambrosini, D. 1999)

Fuerzas en la estructura:

$$Q_y(t) = -[m_y \ddot{y}(t) + m_t \ddot{\eta}(t)] \quad \text{C-1}$$

$$Q_x(t) = -[m_x \ddot{x}(t) + m_t \ddot{\xi}(t)] \quad \text{C-2}$$

Donde:

y: desplazamiento del líquido del ALS en la dirección y.

x: desplazamiento del líquido del ALS en la dirección x.

η : desplazamiento de la estructura en la dirección y.

ξ : desplazamiento de la estructura en la dirección x.

El valor de m_t corresponde a la masa total del agua en el(los) tanque(s), y está dado por la siguiente ecuación:

$$m_t = [n\rho\pi a^2 h] \quad \text{C-3}$$

Donde:

n: número de tanques.

ρ : densidad del fluido (generalmente es agua).

a: radio de cada tanque.

h: tirante (altura de agua en cada tanque).

El valor de m_x es igual a m_y y corresponden a la masa de agua que participa en contrarrestar la fuerza externa (por definición este valor nunca llega a ser igual a m_t). (Ambrosini, D. 1999)

$$m_x = m_y = dFm_t \quad \text{C-4}$$

Donde:

$$d = \frac{1}{(\sigma^2 - 1)} : \text{Parámetro adimensional de reducción } (\sigma=1.84). \quad \text{C-5}$$

$$F = \frac{a}{\sigma h} \tanh \left[\frac{\sigma h}{a} \right] \quad \text{C-6}$$

Ahora se trasladan las ecuaciones al dominio de las frecuencias utilizando la transformada de Fourier: (Ambrosini, D. 1999)

$$Q_y(t) = \omega^2 [m_y y(t) + m_t \eta(t)] \quad \text{C-7}$$

$$Q_x(t) = \omega^2 [m_x x(t) + m_t \xi(t)] \quad \text{C-8}$$

Donde:

$$\omega = \sqrt{\frac{\sigma g}{a} \tanh \left[\frac{\sigma h}{a} \right]} : \text{Frecuencia de los tanques de agua.} \quad \text{C-9}$$

Por último se define el coeficiente de amortiguamiento y la rigidez generada por el ALS cuando este se sintoniza con la frecuencia del edificio. (Ambrosini, D. 1999)

$$k_{(x,y)} = \omega^2 m_{(x,y)} \quad \text{C-10}$$

$$c = 2\zeta \omega m_t \quad \text{C-11}$$

Donde:

ζ : amortiguamiento viscosos del liquido, para agua es 0.04.

Las funciones $y(t), x(t), \eta(t), \xi(t)$ corresponden todas a la condición de movimiento libre amortiguado (ver ecuación B-28). (Ambrosini, D. 1999)

3. Control activo. El control activo para amortiguamiento de estructuras tiene el mismo objetivo que el pasivo: minimizar los desplazamientos laterales provocados por maquinaria, agua en movimiento, sismo, viento etc. La diferencia es que estos pueden ser activados cuando se desee, no solamente cuando existe una amenaza. Sin embargo, se utilizan para incrementar la exactitud y fuerza del movimiento.

Existen de diversos tipos: tendones activos, tirantes activos, sistemas de amortiguadores de masa activos utilizando acción hidráulica, neumática o incluso magnética. (Jamil, M. 2001)

Uno de los inconvenientes de este tipo de sistemas es que necesitan de una fuerza externa no inherente del sistema, tal como flujo eléctrico y por lo tanto son vulnerables a cortes de energía eléctrica (panorama altamente probable durante un sismo). Sin embargo, el futuro de estos sistemas parece ser favorable a medida que la tecnología va evolucionando y los descubrimientos se van acercando cada vez más a la realidad. (Jamil, M. 2001)

4. Control híbrido y semi-activo. El sistema de control híbrido se originó principalmente por la falta de fiabilidad de los sistemas activos dados los inconvenientes que se vieron en la sección anterior. Los sistemas híbridos constan de dos o más sistemas de control activo y pasivo en una misma estructura. Esto para aumentar la fiabilidad por si llegara a fallar el activo. Pero la desventaja de esto es que resulta un sistema bastante más complejo que si se utilizara un solo tipo de sistema. (Jamil, M. 2001)

El sistema híbrido que más investigación ha tenido es el amortiguador de masa. Asimismo es el más utilizado en las obras civiles. La activación del péndulo la da un actuador y regula el movimiento acoplándose a las variantes dinámicas que tiene la estructura en el momento crítico del sismo o agente externo.

Los sistemas de control semi-activos han tenido mucho auge ya que su principal característica yace en el hecho de que pueden funcionar correctamente sin las demandas de energía que tienen los sistemas activos.

Sistema de control	Tipo	Tipo	Dispositivo	
Control pasivo	Aislamiento sísmico	Mecanismos deslizantes o de rodillos	Apoyo de rodillos	
			Apoyo de placa deslizante, tipo péndulo, basculante	
			Capa deslizante	
			otros	
	Disipación de energía	Elemento flexible	De tipo friccionante	Elastómero de multicapas
				Dispositivo flexible
		De tipo histerético	De tipo friccionante	Aceros
				Plomo
		De tipo de fluido	De tipo visco elástico	Amortiguador hidráulico
				Amortiguador de impacto
				Amortiguador de masa sintonizada AMS
				Amortiguador de líquido sintonizado ALS
		Efecto de masa adicional	De tipo de fluido	Amortiguadores viscosos
				Amortiguadores de fricción
De masa resorte				
otros	De tipo pendular	Vibración de líquido		
		otros		
		otros		
Control híbrido	Control de amortiguamiento	Sistemas de amortiguamiento variable	De tipo hidráulico	
	Control de rigidez	Sistemas de rigidez variable	otros	
			otros	
Control activo	Efecto de masa adicional	Tendón activo	Amortiguamiento activo de masa	
			Amortiguamiento híbrido de masa	
	Control de fuerza	otros	otros	
			otros	

IV. MARCO PRÁCTICO

A. Ejecución del edificio control

Los dispositivos de amortiguación y aislación se modelaron en un edificio denominado “control” para facilidad de este trabajo. El edificio presenta una planta típica idéntica en todos los niveles, tiene 25 niveles, una altura de 3.20 metros por nivel. El sistema estructural es de marcos a momento de concreto, no tiene muros de corte ni otro dispositivo rigidizante ni de amortiguamiento.

La estructura no fue diseñada elemento por elemento ya que no es el tema central de este trabajo, por lo tanto se realizó un pre-diseño utilizando algunas normas del código ACI-318-08. (ver anexo 1). Asimismo hay un resumen del diseño final de los elementos (ver anexo 2) y vistas de planta y elevación (anexos 3 y 4 respectivamente).

Como parte de la implementación del edificio se integró la carga de sismo por el método estático y se calibró el sismo dinámico, así como la carga viva y muerta superpuesta (adicional al peso propio). Esta integración se respaldó con el código AGIES, documento 3 NSE 1, documento 4 NSE 2, documento 5 NSE 2.1 y documento 6 NSE 3; también se utilizó el código IBC 2009 para los factores de escala del sismo dinámico. (ver integración en anexo 5). Como comentario adicional, el edificio fue considerado ubicarse en la ciudad de Guatemala y el tipo de ocupación es vivienda (hotel).

Una vez ingresados los datos de las cargas gravitacionales y laterales, el programa Etabs devolvió las cargas por nivel (ver anexos 6 y 7). La carga “DEAD” incluye el peso propio y la carga muerta superpuesta. En el anexo 8 se puede ver el peso propio por elemento.

B. Sistema de Amortiguamiento de Líquido Sintonizado (ALS)

1. Etapas de diseño de los amortiguadores de líquido sintonizado.

Primero, se detallan todas las suposiciones que se emitieron para proceder al análisis matemático y obtener resultados lo suficientemente exactos para poner en práctica el sistema.

- Los tanques de agua no se deslizarán respecto a la estructura.
- Se considera agua como líquido.
- El líquido es completamente homogéneo.
- El líquido es incompresible.
- Las olas que se forman no se interrumpen entre si, es decir, no hay turbulencia.
- No toda la masa de agua en los tanques participa en contrarrestar el sismo en una dirección. (Ver definición "mx" y "my" en cálculos)
- Cuando los tanques son sometidos a una aceleración lineal se forma un plano inclinado recto.
- Únicamente se consideran las cargas laterales en el eje débil ("y") de la estructura (SPECYAGIES y VIENTOY).
- El movimiento oscilatorio del agua en los tanques corresponde a un movimiento libre amortiguado.
- La amplitud de oscilación de las olas es idéntica a la de la estructura.

La cantidad de tanques de agua depende de la demanda sísmica y las derivas permisibles, sin embargo es necesario considerar y respetar varios factores para que la propuesta sea viable.

- La cantidad de agua fue colocada en el último nivel de la estructura para que funcionara apropiadamente, sin embargo, se consideró una carga límite para la de los tanques. Esta fue de 700kg/m², la cual se encuentra en el documento 4 NSE 2, en la sección de cargas vivas para bibliotecas. Se diseñó el sistema de tanques para que la carga de agua no sobrepasara este valor.
- Otro factor limitante fue el espacio, el área de la planta típica es de 763 metros cuadrados, por lo tanto no era posible colocar cualquier cantidad de tanques. Los tanques fueron redondos (ya que el sismo o viento puede afectar en

cualquier sentido), pero para realizar una revisión adecuada se considero que cada tanque ocupaba un espacio de área transversal equivalente a 2 veces el radio, todo esto al cuadrado (transformando el círculo en un cuadrado). De esta forma se consideraron los espacios que quedarían entre tanques circulares. No se consideró colocar tanques en el ducto de elevadores.

- El diseño geométrico de los tanques se realizó para que dicha frecuencia de oscilación fuera similar a la frecuencia natural del edificio. Asimismo, se buscó obtener el valor de rigidez más alto posible para los tanques.
- También se calculó la altura máxima de agua durante la oscilación más crítica para determinar si era necesario sellar los tanques a fin que no se perdiera agua.

A continuación se detallará el procedimiento que se realizó para comprobar si el sistema funcionaba correctamente para el edificio control.

- Paso 1: Obtención de ecuación de movimiento de la estructura:

Se partió de la suposición que el edificio presentaba un movimiento libre amortiguado bajo la acción de una fuerza externa. Como primer punto se determinó la rigidez de la estructura encontrando la inercia respecto al eje x; esto último se realizó con el programa AutoCAD tomando en cuenta únicamente las columnas cuyo desplazamiento lateral correspondía a las derivas. Luego junto con la masa del peso propio de la estructura (Etabs) se determinó la frecuencia natural amortiguada (5% del crítico). Luego el coeficiente de amortiguamiento, el periodo de oscilación y con la condición inicial (en el momento cero el desplazamiento es cero) se encontró el valor de ϕ . Por último se encontró la ecuación de la vibración y se graficó.

Comentario: la amplitud de oscilación se seleccionó a partir del valor máximo de desplazamiento de diafragmas, dado por Etabs.

- Paso 2: Diseño de los tanques:

Se definieron las variables de amortiguamiento viscoso (para agua=0.04), densidad del líquido y el número de tanques a utilizar. Luego se definió la única constante " $\sigma=1.84$ " (constante de reducción de masa de agua).

En cuanto al diseño geométrico de cada tanque se definieron las variables para radio "a" y para nivel estático de agua en cada tanque "h". Esto respetando

principalmente la ecuación C-9 de modo que la frecuencia diera un resultado bastante cercano a la frecuencia natural del edificio:

$$\omega = \sqrt{\frac{\sigma g}{a} \tanh \left[\frac{\sigma h}{a} \right]}$$

Asimismo, se verificó que los valores de “a” y “h” cumplieran con las condiciones de área disponible (763m²), carga última permitida (700kg/m²), alcanzar la rigidez más alta posible y revisión de altura máxima de agua alcanzada en las oscilaciones para determinar si era necesario cerrar los tanques.

- Paso 3: Obtención de parámetros del sistema:

Se obtuvieron los valores para los parámetros de rigidez, coeficiente de amortiguamiento y el valor de m_x y m_y (masa de agua participante en contrarrestar la carga lateral), de acuerdo a las ecuaciones C-10, C-11 y C-4 respectivamente.

- Paso 4: Utilización de la opción Point Springs en Etabs:

Una vez obtenido el valor de la rigidez para dicho escenario, este se le aplica al nivel número 25 del edificio a través de la opción “point springs” en Etabs. Esta opción aplica resortes con la rigidez de los tanques y por lo tanto tienen un comportamiento similar. El valor neto de rigidez encontrada por la totalidad de los tanques fue dividido entre las 38 columnas de la planta y por lo tanto fueron asignados 38 resortes con dicho valor (esto para simular los tanques los cuales van regados en todo el nivel).

- Paso 5: Revisión de derivas para el sismo dinámico en “y”:

Se corre el modelo en Etabs y se revisan las derivas de acuerdo a la última permisible; dato obtenido de acuerdo a los parámetros de AGIES (2% de la altura del nivel de abajo para este caso). Asimismo, estas derivas se comparan con las obtenidas antes de colocar los resortes, afín de observar el porcentaje de reducción. Todo esto únicamente se revisó para el sismo crítico el cual fue el sismo dinámico en el eje débil: “y” (carga SPECYAGIES).

- Paso 6: Gráficas de movimiento y fuerza:

En este último paso se incluyeron gráficas comparando, primero, el movimiento del edificio versus el movimiento del dispositivo (se observará que la frecuencia es la misma pero las graficas están desfasadas de π rad. ya que el agua genera una fuerza

contraria al movimiento de la estructura). Segundo, se muestra una gráfica con el movimiento del edificio sin el ALS y luego con el ALS (se observa una reducción en la amplitud de cada oscilación, aunque la frecuencia natural es casi la misma en las dos curvas). Tercero, se presenta la curva de la fuerza dinámica generada por el choque del agua dentro de los tanques.

- Paso 7: Presentación de las razones de masa, frecuencia, rigidez, amortiguamiento y fuerza.

Como se presentó en el marco teórico, es importante presentar las relaciones entre las características del edificio y los tanques del ALS. La razón de masas no debería exceder el 5% aunque generalmente prevalece la importancia de no exceder los 700kg/m² de carga distribuida. La frecuencia, como ya se mencionó, debe rondar al valor de 1. Luego las relaciones de rigidez y amortiguamiento generalmente dieron valores entre 0.5 y 2% lo cual es bastante lógico. Por último se hace una comparación entre la fuerza máxima generada por el agua en todos los tanques versus el corte basal del sismo dinámico.

2. Cálculos y resultados. En este apartado se presentará cada uno de los siete pasos del apartado anterior con los cálculos detalladamente indicados.

- Paso 1: Ecuación de movimiento para el edificio:

Datos de los elementos principales que participan en la rigidez de la estructura:

$h := 80\text{m}$ Altura del edificio

$g := 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ Aceleración de la gravedad

$m_e := 28122613\text{kg}$ Masa total del edificio

Cálculo de la rigidez

$E := 2738460000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$ Elasticidad del material

Columnas

$I := 2180.87\text{m}^4$ Inercia del edificio respecto al eje x

$k := 3 \cdot \frac{E \cdot g \cdot I}{(h)^3} = 3.43 \times 10^8 \frac{\text{kg}}{\text{s}^2 \times 10^0}$ Rigidez ejercida por todas las columnas respecto al eje x.

Cálculo de la frecuencia natural

$$\omega := \sqrt{\frac{k}{m}} = 3.49 \times 10^0 \frac{1}{s}$$

Frecuencia Natural

$$\omega_n := \omega \cdot \sqrt{1 - 0.05^2} = 3.49 \times 10^0 \frac{1}{s}$$

Frecuencia Natural Amortiguada

Condición de amortiguamientoSubamortiguado (5% del amortiguamiento crítico)

$$c_e := 0.05 \cdot 2 \cdot m \cdot \omega_n = 9.81 \times 10^6 \frac{\text{kg}}{s}$$

Coeficiente de amortiguamiento

Cálculo del período de oscilación

$$T := \frac{2\pi}{\omega_n} = 1.8 \times 10^0 s$$

Periodo

Ecuación de movimiento libre amortiguadoSe plantea la condición inicial siguiente: $x(0)=0$

$$x(t) = D \cdot \left(e^{\frac{-c_e}{2m} \cdot t} \cdot \sin(\omega_n t + \phi) \right)$$

$$0 = D \cdot \left(e^{\frac{-c_e}{2m} \cdot 0} \cdot \sin(\omega_n \cdot 0 + \phi) \right)$$

$$0 = (\sin(\phi))$$

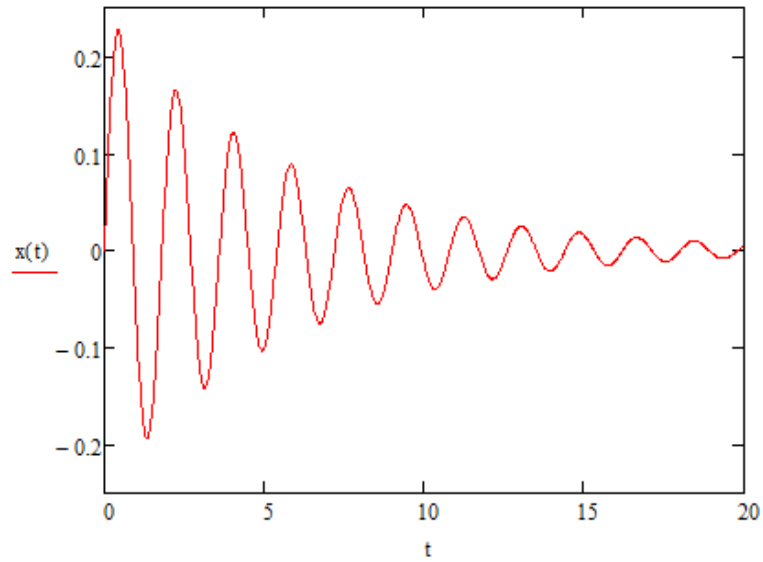
$$\sin^{-1}(0) = \phi = 0$$

$$\phi = 0$$

$$D = 0.245m$$

Amplitud del movimiento lateral obtenido de Etabs, ver tablas de excel

$$x(t) = D \cdot \left(e^{\frac{-c_e}{2m} \cdot t} \cdot \sin(\omega_n t + \phi) \right)$$

Ilustración 50: Amplitud del movimiento lateral

Fuente: Elaboración propia

- Paso 2 y 3: Diseño de tanques y obtención de parámetros:

Definición de Variables:

$\zeta t := 0.04$ Amortiguamiento viscoso del líquido

$\rho := 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ Densidad del líquido

$n := 74$ Cantidad de tanques

Definición de Constantes:

$\sigma := 1.84$ constante para m_t (definido mas adelante)

Diseño de los tanques

Se propone un valor para a y para h a fin de ajustar la frecuencia de los dispositivos con la del edificio y al mismo tiempo tratando de obtener el valor de kx más alto posible y considerando la condición de espacio:

$$a := 1.35\text{m}$$

$$h := 1.2\text{m}$$

$$\omega_e := \sqrt{\frac{\sigma \cdot g}{a} \cdot \tanh\left(\frac{\sigma \cdot h}{a}\right)} = 3.52 \times 10^0 \frac{1}{\text{s}} \quad \frac{\omega_n}{\omega_e} = 9.91 \times 10^{-1}$$

Verificación del espacio de los tanques en el último nivel del edificio, o terraza; condición: $A1 - A2 > 0$.

$$A1 := 703.58\text{m}^2 \quad \text{Área total por planta, sin contemplar ducto de elevadores.}$$

$$A2 := (2a)^2 \cdot n = 5.39 \times 10^2 \text{m}^2 \cdot 2 \times 10^0 \quad \text{Área que ocupan los tanques, considerando los espacios vacíos entre tanques (se consideraron cuadrados sólo para efecto de esta verificación.)}$$

$$A1 - A2 = 1.64 \times 10^2 \text{m}^2 \cdot 2 \times 10^0 \quad \text{Condición}$$

Se calcula la altura máxima que alcanzaría el agua dentro del tanque cuando choque contra el extremo del tanque.

Cálculo de aceleración máxima a la cual será sometido cada tanque:

$$C_{\text{basal}} := 14312.8\text{kN} \quad \text{Corte basal dado por Etabs}$$

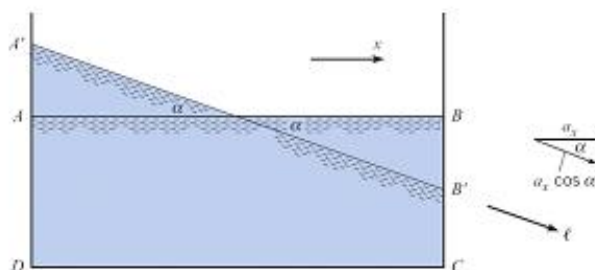
$$C1 := \frac{C_{\text{basal}}}{n} = 1.93 \times 10^5 \text{N} \quad \text{Corte basal que recibe cada tanque}$$

$$V := \pi a^2 \cdot h = 6.87 \times 10^3 \text{L} \quad \text{Volumen de cada tanque}$$

$$m1 := V \cdot \rho = 6.87 \times 10^3 \text{kg} \quad \text{Masa por tanque}$$

$$a_{ce} := \frac{C1}{m1} = 2.82 \times 10^1 \frac{\text{m}}{\text{s}^2 \cdot 2 \times 10^0} \quad \text{Aceleración que recibe cada tanque}$$

Ilustración 51: representación de la aceleración que recibe cada tanque



Fuente: Elaboración propia

De mecánica de fluidos sabemos lo siguiente:

$$\tan(\alpha) = \frac{a \cdot c}{g}$$

$$\alpha := \frac{180}{\pi} \operatorname{atan}\left(\frac{a \cdot c}{g}\right) = 7.08 \times 10^1 \quad \text{Ángulo en grados, de la pendiente del agua.}$$

Ángulo en radianes.

Por geometría tenemos:

$$\tan(\alpha) = \frac{\Delta h}{a}$$

$$\Delta h := a \cdot \tan\left(\frac{\pi}{180} \alpha\right) = 3.87 \times 10^0 \text{ m} \quad \Delta h \text{ es la altura que subirá adicional al tirante normal de } 0.8 \text{ m. Como esta altura excede la altura del último nivel, se deberán sellar los tanques.}$$

Parámetros de los dispositivos:

$$m_t := n \cdot \rho \cdot \pi \cdot a^2 \cdot h = 5.08 \times 10^5 \text{ kg} \quad \text{Masa de todo el líquido en el cuarto de máquinas.}$$

Se determina la porción de la masa total m_t que participa del sismo (m_x y m_y).

$$d := \frac{1}{\sigma^2 - 1} = 4.19 \times 10^{-1}$$

$$F_{\omega} := \frac{a}{\sigma \cdot h} \cdot \tanh\left(\frac{\sigma \cdot h}{a}\right) = 5.67 \times 10^{-1}$$

$m_x := d \cdot F \cdot m_t = 1.21 \times 10^5 \text{ kg}$ Masa de agua que participa en contrarrestar el sismo.

$m_y := m_x$

$k_x := \omega_e^2 \cdot m_x = 1.5 \times 10^6 \frac{\text{kg}}{\text{s}^2 \times 10^0}$ Rigidez de los dispositivos en el plano de la fuerza

$k_y := k_x$

$c := 2 \cdot \zeta_t \cdot \omega_e \cdot m_t = 1.43 \times 10^5 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$ Coeficiente de amortiguamiento de los dispositivos

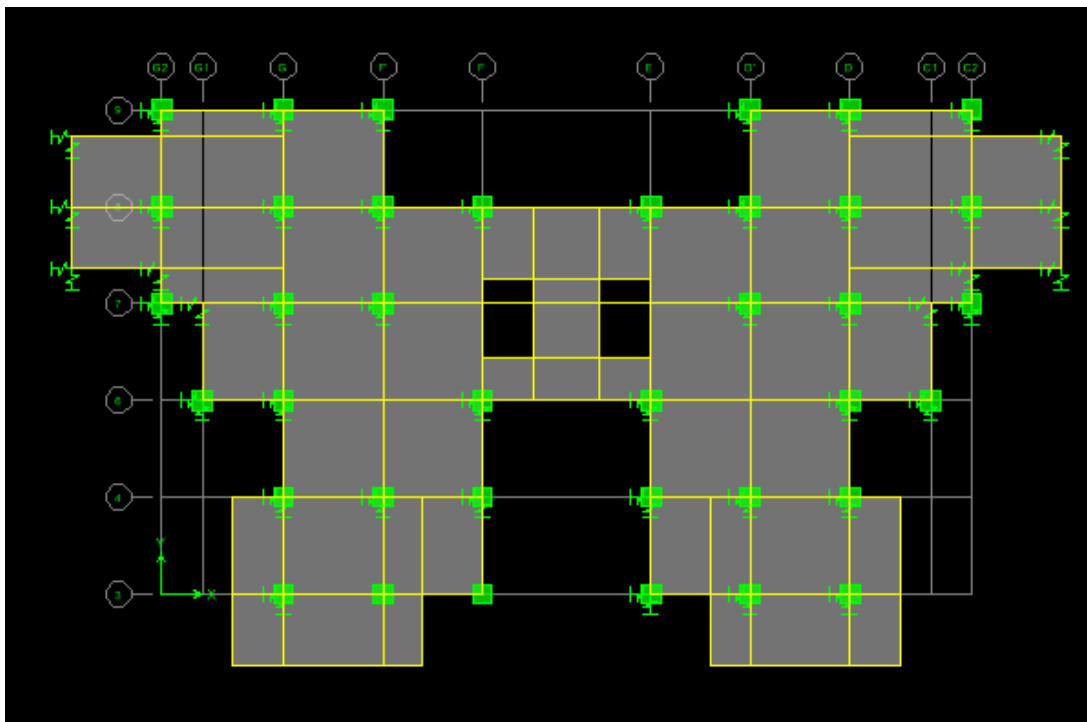
Verificación de masa: la carga total ejercida por los tanques de agua no debe exceder los 700kg/m², valor máximo de la carga viva según AGIES documento NSE 2.

$A_{\text{planta}} := 763 \text{ m}^2$ Área de la planta típica del último nivel.

$U_1 := \frac{m_t}{A_{\text{planta}}} \cdot 1.05 = 7 \times 10^2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \times 10^0}$ Carga distribuida ejercida por los tanques de agua. No debe exceder de 700kg/m².

- Paso 4 y 5: Ingreso de “point springs” en Etabs y revisión de derivas para la carga de sismo:

Ilustración 52: Asignación de resortes en Etabs.



Fuente: Elaboración Propia

Cuadro 2: Derivas sin el dispositivo, con carga sísmica

Nivel	Carga	% de Deriva Elástica por nivel	Deriva Post elástica ($\delta \cdot C_d \cdot h$, en cm.)	Deriva permisible ($\Delta=2\%$ de h)	Desplazamiento por nivel (en cm.)	% ($\delta \cdot C_d / \Delta$)
25	SPECYAGIES	0.1%	2.60	6.40	0.47	40%
24		0.2%	3.00	6.40	0.55	47%
23		0.2%	3.40	6.40	0.62	54%
22		0.2%	3.90	6.40	0.71	60%
21		0.2%	4.20	6.40	0.76	66%
20		0.3%	4.50	6.40	0.82	71%
19		0.3%	4.80	6.40	0.87	75%
18		0.3%	5.10	6.40	0.93	79%
17		0.3%	5.30	6.40	0.96	82%
16		0.3%	5.50	6.40	1.00	86%
15		0.3%	5.70	6.40	1.04	89%
14		0.3%	5.80	6.40	1.05	91%
13		0.3%	6.00	6.40	1.09	94%
12		0.3%	6.20	6.40	1.13	96%
11		0.4%	6.30	6.40	1.15	98%
10		0.4%	6.40	6.40	1.16	100%
9		0.4%	6.50	6.40	1.18	102%
8		0.4%	6.70	6.40	1.22	104%
7		0.4%	6.80	6.40	1.24	106%
6		0.4%	6.90	6.40	1.25	107%
5		0.4%	6.90	6.40	1.25	108%
4		0.4%	6.90	6.40	1.25	108%
3		0.4%	6.70	6.40	1.22	105%
2		0.3%	5.90	6.40	1.07	93%
1		0.2%	3.00	6.40	0.55	46%
<i>Promedio:</i>						<u>84.36%</u>

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 3: Derivas con el dispositivo, con carga sísmica

Cd	5.5	AGIES				
Nivel	Carga	% de Deriva Elástica por nivel	Deriva Post elástica ($\delta \cdot Cd \cdot h$, en cm.)	Deriva permisible ($\Delta=2\%$ de h)	Desplazamiento por nivel (en cm.)	% ($\delta \cdot Cd / \Delta$)
25	SPECYAGIES	0.1%	1.50	6.40	0.27	24%
24		0.1%	1.90	6.40	0.35	29%
23		0.1%	2.30	6.40	0.42	36%
22		0.2%	2.80	6.40	0.51	43%
21		0.2%	3.10	6.40	0.56	49%
20		0.2%	3.50	6.40	0.64	54%
19		0.2%	3.80	6.40	0.69	59%
18		0.2%	4.00	6.40	0.73	63%
17		0.2%	4.30	6.40	0.78	67%
16		0.3%	4.50	6.40	0.82	71%
15		0.3%	4.80	6.40	0.87	74%
14		0.3%	5.00	6.40	0.91	78%
13		0.3%	5.20	6.40	0.95	81%
12		0.3%	5.40	6.40	0.98	84%
11		0.3%	5.60	6.40	1.02	87%
10		0.3%	5.70	6.40	1.04	89%
9		0.3%	5.90	6.40	1.07	92%
8		0.3%	6.00	6.40	1.09	94%
7		0.4%	6.20	6.40	1.13	96%
6		0.4%	6.30	6.40	1.15	98%
5		0.4%	6.40	6.40	1.16	100%
4		0.4%	6.40	6.40	1.16	100%
3		0.4%	6.30	6.40	1.15	98%
2		0.3%	5.60	6.40	1.02	87%
1		0.2%	2.80	6.40	0.51	44%
<i>Promedio</i>					<u>71.93%</u>	

Fuente: Elaboración propia

- Paso 6: Gráficas.

Gráfica mostrando dos curvas, la roja muestra el movimiento del edificio y la azul el movimiento oscilatorio del agua dentro de los tanques:

$$\eta(t) := D \cdot \left[e^{-\left(\frac{ce}{2 \cdot m\dot{\xi}}\right) \cdot t} \cdot \sin(\omega_n \cdot t + \phi) \right] \quad \text{Función desplazamiento del edificio.}$$

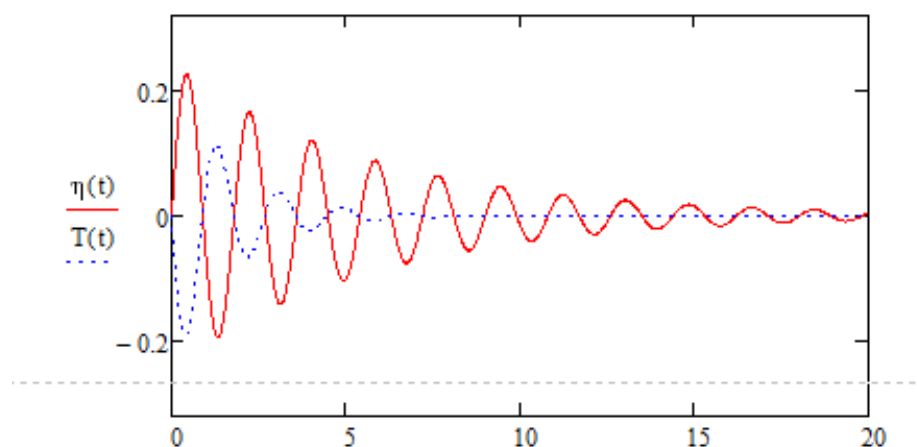
Se determina el movimiento del agua horizontalmente.

$A_{\text{tanque}} := D$ Amplitud del movimiento del tanque.

La amplitud del movimiento oscilatorio del agua se iguala a la del edificio. Se observó experimentalmente que en la primera oscilación, una partícula flotante se mueve aproximadamente igual al movimiento del tanque o recipiente, independientemente de la aceleración inducida.

$$T(t) := A \cdot \left[e^{-\left(\frac{c}{2 \cdot m\dot{\xi}}\right) \cdot t} \cdot \sin(\omega_e \cdot t + \phi + \pi) \right] \quad \text{Función del movimiento de las olas en cada tanque.}$$

Ilustración 53: Desplazamiento de los tanques vs. El edificio



Fuente: Elaboración propia

Gráfica que muestra el movimiento del edificio sin el sistema de ALS (curva en rojo) y luego otra del edificio con el sistema de ALS (curva en azul):

Se encuentran los parámetros sísmicos para la estructura con los dispositivos incorporados como un solo sistema.

$$c_{tot} := c + c_e = 9.96 \times 10^6 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad \text{Coeficiente de amortiguamiento total}$$

$$k_{tot} := k_x + k = 3.45 \times 10^8 \frac{\text{kg}}{\text{s}^2 \times 10^0} \quad \text{Rigidez total}$$

$$m_{tot} := m_x + m_e = 2.82 \times 10^7 \text{ kg} \quad \text{Masa total}$$

Frecuencia

$$m_{tot} := m_e + m_x = 2.82 \times 10^7 \text{ kg}$$

$$\omega_{tot} := \sqrt{\frac{k_{tot}}{m_{tot}}} = 3.49 \times 10^0 \frac{1}{\text{s}}$$

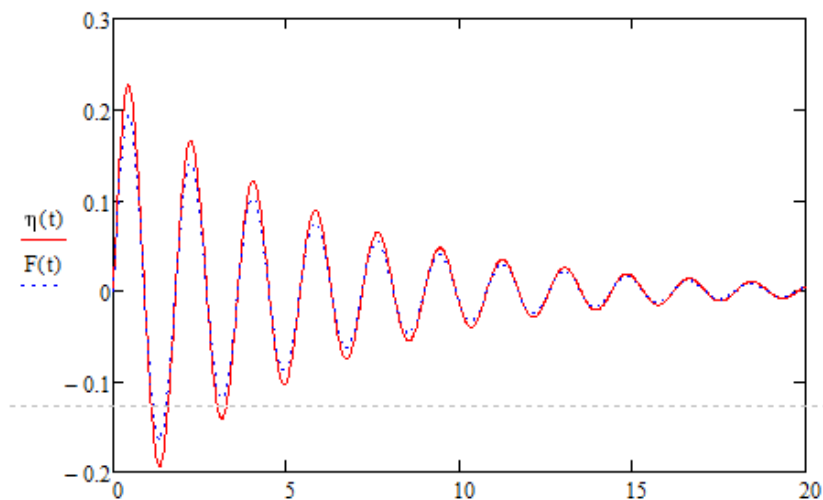
$$\eta(t) := D \left[e^{-\left(\frac{c_e}{2 \cdot m_e}\right) t} \cdot \sin(\omega_n t + \phi) \right] \quad \text{Función desplazamiento de la estructura.}$$

$$A_1 := 0.209 \text{ m}$$

Amplitud nueva, obtenida de Etabs (ver tablas de excel)

$$F(t) := A_1 \left[e^{-\left(\frac{c_{tot}}{2 \cdot m_{tot}}\right) t} \cdot \sin(\omega_{tot} t + \phi) \right] \quad \text{Función desplazamiento de la estructura con los dispositivos.}$$

Ilustración 54: Comparación de movimiento con y sin dispositivo

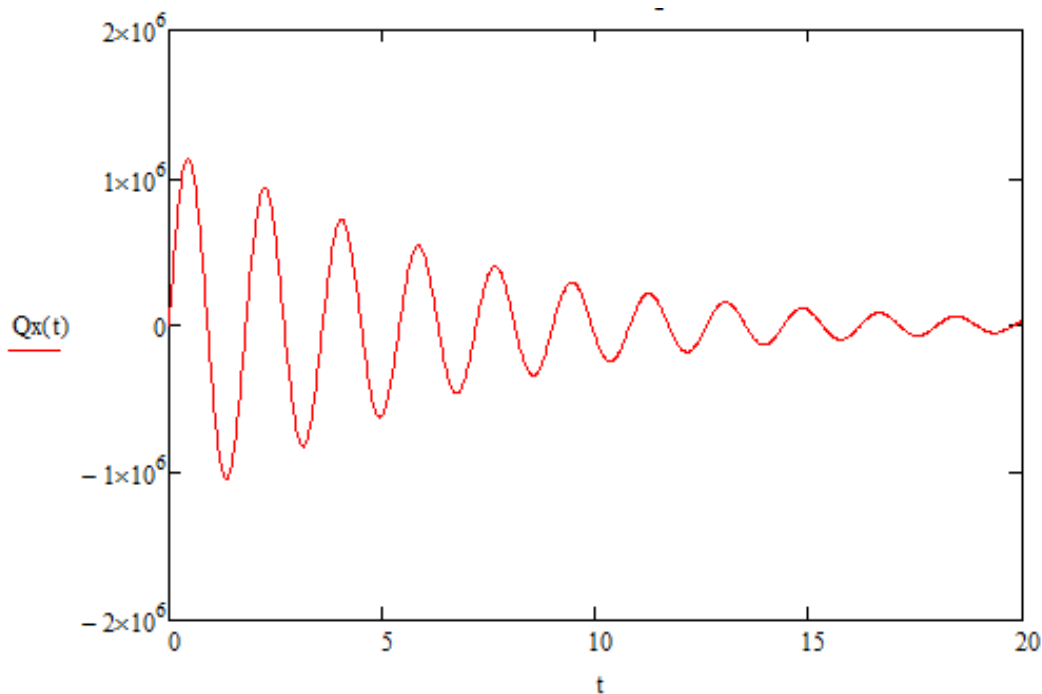


Fuente: Elaboración propia

Gráfica mostrando la fuerza ejercida por el agua de los tanques:

$$Q_x(t) := \omega^2 (m_x \cdot T(t) + m_t \cdot \eta(t))$$

Ilustración 55: Fuerza de los dispositivos



- Paso 7: Relaciones:

Relaciones

$$M := \frac{m_t}{m_e} = 1.81 \times 10^{-2}$$

Razón de masas

$$\omega := \frac{\omega_n}{\omega_e} = 9.91 \times 10^{-1}$$

Razón de frecuencias

$$K := \frac{k_x}{k} = 4.36 \times 10^{-3}$$

Razón de rigideces

$$C := \frac{c}{c_e} = 1.46 \times 10^{-2}$$

Razón de amortiguamientos

$$\frac{Q_x\left(\frac{\tau}{4}\right)}{C_{\text{basal}} \cdot 1000} = 7.89 \times 10^{-5}$$

Fuerza máxima generada por los dispositivos vs. corte basal.

C. Amortiguadores laterales

1. Etapas de análisis de los amortiguadores laterales

Paso 1: Para la realización de estos cálculos se asumieron ciertas condiciones con el objetivo de simplificar el sistema. En el caso del dispositivo de amortiguadores laterales se tomó como premisa la Ley de Hooke, con el objetivo de modelar el amortiguador como un resorte. Bajo esta premisa se busca calcular el coeficiente de rigidez de cada amortiguador. Para ello se realizó la distribución del corte basal por nivel, y se fijó una deformación permisible al resorte menor a los desplazamientos críticos del edificio control. Por medio de este método se identificó la fuerza actuante en el nivel con mayor deriva lo que brinda un coeficiente de rigidez para el nivel que permite controlar los desplazamientos. Para efectos de esta práctica se tomó la decisión de colocar un mínimo de dos dispositivos por planta, en las plantas necesarias. Esto con el objetivo de mantener una configuración simétrica, por lo que la rigidez necesaria por nivel se distribuye en el número de dispositivos instalados.

Paso 2: Utilizando la información anterior se procedió a realizar una simulación de la interacción del dispositivo con la estructura despreciando parámetros como la masa del dispositivo y el coeficiente de amortiguamiento del mismo. En esta gráfica se puede visualizar la reducción del desplazamiento en un sistema libremente amortiguado por nivel.

Paso 3: Utilizando el coeficiente de rigidez crítico se realizaron pruebas en ETABS ingresando en primera instancia dos dispositivos por nivel y se verificaron las derivas, luego se llevó a cabo el mismo procedimiento instalando dispositivos a cada dos niveles y por último únicamente en los niveles (20, 16, 12, 8 y 4). Este procedimiento se realizó con el objetivo de optimizar el funcionamiento de los dispositivos.

Paso 4: Debido a que lo anterior fue un análisis para encontrar la demanda de un amortiguador, se procedió a probar un amortiguador comercial. Este amortiguador se llama Taylor y sus especificaciones están detalladas en el marco teórico. Utilizando estos parámetros se pudo obtener la rigidez del amortiguador, el coeficiente de pérdida (la cual está en función de la energía máxima y la energía disipada), el coeficiente de amortiguamiento y la interacción del mismo aplicado a la estructura. Para la práctica se

tomó la cantidad óptima de amortiguadores utilizadas en el paso anterior y se igualaron las rigideces por lo que se pudo obtener un aproximado de la cantidad de amortiguadores Taylor para satisfacer la demanda del edificio. Luego de obtener esta cantidad se distribuyó simétricamente en el edificio, se verificaron las derivas y se procedió a validar este procedimiento con la gráfica comparativa entre el edificio control y el edificio con los dispositivos instalados.

2. Cálculos y resultados.

Paso 1: Distribución de corte basal y cálculo del coeficiente de rigidez del amortiguador.

Piso	VY Ton	H m	M Ton	H*M	F(kN) Nivel	D Piso	k kN/mm	k por resorte (kN/m m)
25	204.16	80.00	1,124.90	89,992.36	1,264.83	0.005	272.59	136.30
24	387.94	76.80	1,124.90	86,392.67	1,214.23	0.005	223.73	111.87
23	537.13	73.60	1,124.90	82,792.97	1,163.64	0.006	186.00	93.00
22	656.69	70.40	1,124.90	79,193.28	1,113.05	0.007	158.75	79.38
21	751.83	67.20	1,124.90	75,593.58	1,062.45	0.008	138.51	69.26
20	827.98	64.00	1,124.90	71,993.89	1,011.86	0.008	122.75	61.38
19	890.35	60.80	1,124.90	68,394.19	961.27	0.009	109.95	54.98
18	943.53	57.60	1,124.90	64,794.50	910.67	0.009	99.09	49.54
17	991.18	54.40	1,124.90	61,194.81	860.08	0.010	89.65	44.83
16	1,035.8	51.20	1,124.90	57,595.11	809.49	0.010	81.26	40.63
15	1,078.9	48.00	1,124.90	53,995.42	758.90	0.010	73.65	36.83
14	1,121.2	44.80	1,124.90	50,395.72	708.30	0.011	66.67	33.34
13	1,162.8	41.60	1,124.90	46,796.03	657.71	0.011	60.24	30.12
12	1,203.8	38.40	1,124.90	43,196.33	607.12	0.011	54.25	27.13
11	1,244.3	35.20	1,124.90	39,596.64	556.52	0.011	48.62	24.31
10	1,284.8	32.00	1,124.90	35,996.94	505.93	0.012	43.32	21.66
9	1,326.2	28.80	1,124.90	32,397.25	455.34	0.012	38.26	19.13
8	1,369.7	25.60	1,124.90	28,797.56	404.74	0.012	33.43	16.71
7	1,416.3	22.40	1,124.90	25,197.86	354.15	0.012	28.78	14.39
6	1,466.1	19.20	1,124.90	21,598.17	303.56	0.012	24.32	12.16
5	1,518.6	16.00	1,124.90	17,998.47	252.97	0.013	20.05	10.03

Piso	VY Ton	H m	M Ton	H*M	F(kN) Nivel	D Piso	k kN/mm	k por resorte (kN/m m)
4	1,571.0	12.80	1,124.90	14,398.78	202.37	0.013	16.03	8.02
3	1,619.0	9.60	1,124.90	10,799.08	151.78	0.012	12.37	6.18
2	1,656.4	6.40	1,124.90	7,199.39	101.19	0.011	9.36	4.68
1	1,676.1	3.20	1,124.90	3,599.69	50.59	0.005	9.39	4.70
			Σ	1,169,900				

Paso 2: Contribución los Amortiguadores por Nivel

PARÁMETROS DEL EDIFICIO

$$h := 3.2\text{m} \quad \text{Altura del nivel}$$

$$g := 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \quad \text{Gravedad.}$$

$$m_e := \frac{28122613}{25} \text{kg} = 1.125 \times 10^6 \text{kg} \quad \text{Masa del Nivel}$$

Cálculo de la rigidez

$$E := 2738460000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \quad \text{Elasticidad del material}$$

$$I_c := 2180.87 \text{m}^4 \quad \text{Inercia de la estructura}$$

$$k_e := 3 \cdot \frac{g \cdot E \cdot I_c}{h^3} = 5.364 \times 10^{12} \frac{\text{kg}}{\text{s}^2} \quad \text{Rigidez del Nivel.}$$

Cálculo de la frecuencia natural y período

$$\omega := \sqrt{\frac{(kc)}{me}} = 2.184 \times 10^3 \frac{1}{s} \quad \text{Frecuencia Natural}$$

$$\omega_n := \omega \cdot \sqrt{1 - 0.05^2} = 2.181 \times 10^3 \frac{1}{s} \quad \text{Frecuencia Natural Amortiguada}$$

$$\tau := \frac{2\pi}{\omega} = 2.877 \times 10^{-3} s \quad \text{Periodo de la estructura}$$

INTERACCIÓN DISPOSITIVO VS. ESTRUCTURA

$D := 0.013m$ El desplazamiento entre niveles

$\phi := 0$ Parámetro para la ecuación de movimiento del edificio.

$ce := 0.05 \cdot 2 \cdot me \cdot \omega_n = 2.453 \times 10^8 \frac{kg}{s}$ Coeficiente de amortiguamiento del nivel

$\eta(t) := D \cdot \left[e^{-\left(\frac{ce}{2 \cdot me}\right) \cdot t} \cdot \sin(\omega \cdot t + \phi) \right]$ Función desplazamiento del edificio.

Parámetros para el movimiento del amortiguador.

$N_d := 2$ Número de amortiguadores instalados a la estructura.

$f := 252965.19\text{N}$ Fuerza del sismo en el nivel

$x_d := 0.012\text{m}$ Desplazamiento fijado para el dispositivo en función de lo deseado para que la deriva del nivel sea menor al 2%.

$k_d := \frac{f}{x_d} = 2.108 \times 10^7 \frac{\text{kg}}{\text{s}^2}$ Coeficiente de rigidez Necesario en el Nivel

$k_{dis} := \frac{k_d}{N_d} = 1.054 \times 10^7 \frac{\text{kg}}{\text{s}^2}$ Coeficiente de rigidez del amortiguador

Desplazamiento del edificio sin el dispositivos y con el dispositivo

Se encuentran los parámetros sísmicos para la estructura con el dispositivo como un sistema.

$c_{tot} := c_e = 2.453 \times 10^8 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$ Coeficiente de amortiguamiento total despreciando el del amortiguador ya que es muy pequeño

$k_{tot} := N_d \cdot k_d + k_e = 5.364 \times 10^{12} \frac{\text{kg}}{\text{s}^2}$ Rigidez total

$m_{tot} := m_e = 1.125 \times 10^6 \text{kg}$ Masa total

$\omega_f := \sqrt{\frac{k_{tot}}{m_{tot}}} = 2.184 \times 10^3 \frac{1}{\text{s}}$ Frecuencia final con el dispositivo incluido.

$T_{\omega\omega} := 2 \frac{\pi}{\omega_f} = 2.877 \times 10^{-3} \text{s}$

$\Delta_{\omega\omega} := 0.008$ Deriva máxima en la estructura con el dispositivo.

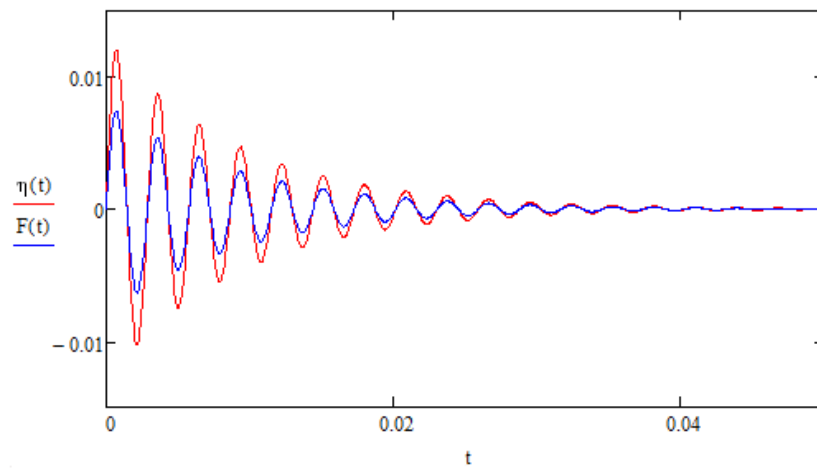
$$\eta(t) := D \cdot \left[e^{-\left(\frac{c}{2 \cdot m \omega}\right) \cdot t} \cdot \sin(\omega \cdot t + \phi) \right]$$

Función desplazamiento de la estructura.

$$\xi(t) := A \cdot \left[e^{-\left(\frac{c \cdot t \cdot \omega}{2 \cdot m \cdot \omega}\right) \cdot t} \cdot \sin(\omega \cdot t + \phi) \right]$$

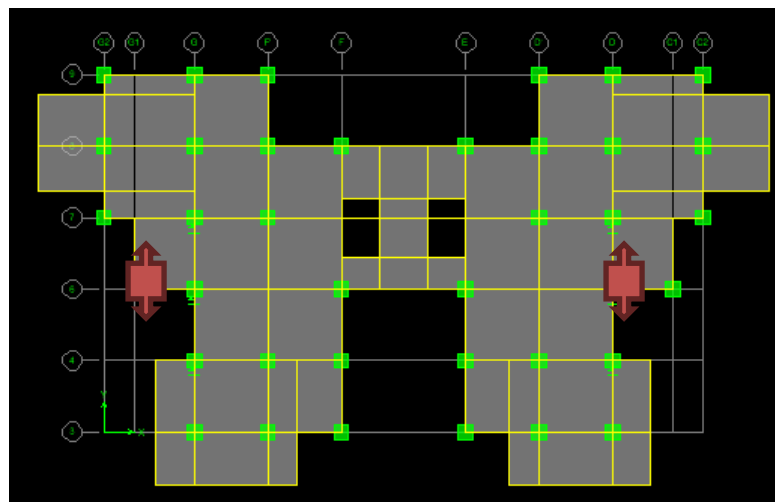
Función desplazamiento de la estructura con el dispositivo.

Movimiento Libre Amortiguado Nivel Control vs Nivel con Amortiguadores



Paso 3: Pruebas del amortiguador utilizando ETABS

Planta de ubicación de los amortiguadores



Control de derivas por nivel en edificio control

Nivel	Carga	% de Deriva Elástica por nivel	Deriva Post elástica ($\delta \cdot Cd \cdot h$, en cm.)	Deriva permisible ($\Delta=2\%$ de h)	Desplazamiento por nivel (en cm.)	% ($\delta \cdot Cd / \Delta$)
25	SPECYAGIES	0.1%	2.60	6.40	0.47	40%
24		0.2%	3.00	6.40	0.55	47%
23		0.2%	3.40	6.40	0.62	54%
22		0.2%	3.90	6.40	0.71	60%
21		0.2%	4.20	6.40	0.76	66%
20		0.3%	4.50	6.40	0.82	71%
19		0.3%	4.80	6.40	0.87	75%
18		0.3%	5.10	6.40	0.93	79%
17		0.3%	5.30	6.40	0.96	82%
16		0.3%	5.50	6.40	1.00	86%
15		0.3%	5.70	6.40	1.04	89%
14		0.3%	5.80	6.40	1.05	91%
13		0.3%	6.00	6.40	1.09	94%
12		0.3%	6.20	6.40	1.13	96%
11		0.4%	6.30	6.40	1.15	98%
10		0.4%	6.40	6.40	1.16	100%
9		0.4%	6.50	6.40	1.18	102%
8		0.4%	6.70	6.40	1.22	104%
7		0.4%	6.80	6.40	1.24	106%
6		0.4%	6.90	6.40	1.25	107%
5		0.4%	6.90	6.40	1.25	108%
4		0.4%	6.90	6.40	1.25	108%
3		0.4%	6.70	6.40	1.22	105%
2		0.3%	5.90	6.40	1.07	93%
1		0.2%	3.00	6.40	0.55	46%
Promedio					84.36%	

Control de derivas por nivel en edificio con amortiguadores instalados en todos los niveles

Nivel	Carga	% de Deriva Elástica por nivel	Deriva Post elástica ($\delta \cdot C_d \cdot h$, en cm.)	Deriva permisible ($\Delta = 2\%$ de h)	Desplazamiento por nivel (en cm.)	% ($\delta \cdot C_d / \Delta$)
25	SPECYAGIES	0.1%	1.40	6.40	0.25	21%
24		0.1%	1.70	6.40	0.31	26%
23		0.1%	1.90	6.40	0.35	30%
22		0.1%	2.20	6.40	0.40	34%
21		0.1%	2.40	6.40	0.44	37%
20		0.1%	2.50	6.40	0.45	39%
19		0.1%	2.60	6.40	0.47	40%
18		0.2%	2.60	6.40	0.47	41%
17		0.2%	2.70	6.40	0.49	42%
16		0.2%	2.70	6.40	0.49	42%
15		0.2%	2.70	6.40	0.49	43%
14		0.2%	2.80	6.40	0.51	43%
13		0.2%	2.80	6.40	0.51	44%
12		0.2%	2.80	6.40	0.51	44%
11		0.2%	2.90	6.40	0.53	45%
10		0.2%	2.90	6.40	0.53	46%
9		0.2%	3.00	6.40	0.55	47%
8		0.2%	3.10	6.40	0.56	48%
7		0.2%	3.20	6.40	0.58	50%
6		0.2%	3.30	6.40	0.60	52%
5		0.2%	3.50	6.40	0.64	54%
4		0.2%	3.60	6.40	0.65	55.94%
3		0.2%	3.60	6.40	0.65	56%
2		0.2%	3.30	6.40	0.60	51%
1		0.1%	1.70	6.40	0.31	26%
				Promedio		42.26%

Control de derivas por nivel en edificio con amortiguadores instalados cada 2 niveles

Nivel	Carga	% de Deriva Elástica por nivel	Deriva Post elástica ($\delta \cdot Cd \cdot h$, en cm.)	Deriva permisible ($\Delta=2\%$ de h)	Desplazamiento por nivel (en cm.)	% ($\delta \cdot Cd / \Delta$)
25	SPECYAGIES	0.1%	1.90	6.40	0.35	30%
24		0.1%	2.20	6.40	0.40	34%
23		0.1%	2.50	6.40	0.45	39%
22		0.2%	2.80	6.40	0.51	43%
21		0.2%	3.00	6.40	0.55	47%
20		0.2%	3.10	6.40	0.56	49%
19		0.2%	3.30	6.40	0.60	51%
18		0.2%	3.30	6.40	0.60	52%
17		0.2%	3.40	6.40	0.62	54%
16		0.2%	3.50	6.40	0.64	54%
15		0.2%	3.50	6.40	0.64	55%
14		0.2%	3.60	6.40	0.65	56%
13		0.2%	3.60	6.40	0.65	57%
12		0.2%	3.70	6.40	0.67	57%
11		0.2%	3.70	6.40	0.67	58%
10		0.2%	3.80	6.40	0.69	59%
9		0.2%	3.90	6.40	0.71	60%
8		0.2%	3.90	6.40	0.71	62%
7		0.2%	4.10	6.40	0.75	64%
6		0.2%	4.20	6.40	0.76	65%
5		0.2%	4.30	6.40	0.78	67%
4		0.3%	4.40	6.40	0.80	68.81%
3		0.2%	4.40	6.40	0.80	68%
2		0.2%	3.90	6.40	0.71	61%
1		0.1%	2.00	6.40	0.36	31%
				Promedio		53.70%

Control de derivas por nivel en edificio con amortiguadores instalados en los niveles 20, 16, 12, 8 y 4

Nivel	Carga	% de Deriva Elástica por nivel	Deriva Post elástica ($\delta \cdot C_d \cdot h$, en cm.)	Deriva permisible ($\Delta = 2\%$ de h)	Desplazamiento por nivel (en cm.)	% ($\delta \cdot C_d / \Delta$)
25	SPECYAGIES	0.1%	2.40	6.40	0.44	38%
24		0.2%	2.90	6.40	0.53	46%
23		0.2%	3.40	6.40	0.62	54%
22		0.2%	3.90	6.40	0.71	60%
21		0.2%	4.10	6.40	0.75	65%
20		0.2%	4.20	6.40	0.76	65%
19		0.2%	4.30	6.40	0.78	68%
18		0.3%	4.50	6.40	0.82	71%
17		0.3%	4.70	6.40	0.85	73%
16		0.3%	4.60	6.40	0.84	72%
15		0.3%	4.70	6.40	0.85	73%
14		0.3%	4.80	6.40	0.87	75%
13		0.3%	4.90	6.40	0.89	76%
12		0.3%	4.80	6.40	0.87	75%
11		0.3%	4.90	6.40	0.89	76%
10		0.3%	5.00	6.40	0.91	78%
9		0.3%	5.10	6.40	0.93	79%
8		0.3%	5.10	6.40	0.93	79%
7		0.3%	5.20	6.40	0.95	81%
6		0.3%	5.30	6.40	0.96	83%
5		0.3%	5.40	6.40	0.98	85%
4		0.3%	5.40	6.40	0.98	84.87%
3		0.3%	5.30	6.40	0.96	83%
2		0.3%	4.70	6.40	0.85	74%
1		0.1%	2.40	6.40	0.44	37%
				Promedio		69.99%

Paso 4: Aplicación de amortiguadores TaylorPARÁMETROS DEL EDIFICIO

$$k := 3.433 \times 10^8 \frac{\text{kg}}{\text{s}^2} \quad \text{Rigidez del edificio}$$

$$\omega := 3.489 \frac{1}{\text{s}} \quad \text{Frecuencia Natural del edificio}$$

$$\omega t := \omega$$

$$m_e := 28122613 \text{ kg} \quad \text{Masa del edificio}$$

$$T := \frac{2\pi}{\omega} = 1.801 \text{ s} \quad \text{Periodo de la estructura}$$

PARÁMETROS DEL DISPOSITIVO

$$m_{dis} := 136 \text{ kg} \quad \text{Masa del dispositivo}$$

$$x_d := 1.2 \text{ m} \quad \text{Desplazamiento máximo del dispositivo}$$

$$F_d := 1456000 \text{ N} \quad \text{Fuerza máxima del dispositivo}$$

$$E_d := 2.17 \text{ MW} \cdot T = 3.908 \times 10^6 \text{ J} \quad \text{Energía disipada por el dispositivo}$$

$$F_{sis} := 2859.88 \text{ ton} \cdot 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 2.545 \times 10^7 \text{ N} \quad \text{Corte Vasal}$$

$$x_{sis} := 0.245 \text{ m} \quad \text{Deriva máxima}$$

$$E_{dis} := \frac{F_d \cdot x_d}{2} = 8.736 \times 10^5 J \quad \text{Energía del dispositivo}$$

$$\xi := \frac{E_d}{4\pi \cdot E_{dis}} = 0.356 \quad \text{Coeficiente de pérdida del amortiguador}$$

$$k_d := \frac{F_d}{x_d} = 1.213 \times 10^6 \frac{kg}{s^2} \quad \text{Coeficiente de rigidez del amortiguador}$$

Coeficiente de amortiguamiento del dispositivo

$$c_{dis} := \frac{\xi \cdot m_{dis} \cdot \omega}{2} = 84.455 \frac{kg}{s}$$

INTERACCIÓN DISPOSITIVO VS. ESTRUCTURA

$$D := 0.245m \quad \text{Amplitud de la función desplazamiento (deriva máxima del edificio.)}$$

$$\phi = 0 \quad \text{Parámetro para la ecuación de movimiento del edificio.}$$

$$c_e := 9.813 \times 10^6 \frac{kg}{s} \quad \text{Coeficiente de amortiguamiento del edificio}$$

$$\eta(t) := D \cdot \left[e^{-\left(\frac{c_e}{2 \cdot m_e}\right) \cdot t} \cdot \sin(\omega \cdot t + \phi) \right] \quad \text{Función desplazamiento del edificio.}$$

Parámetros para el movimiento del amortiguador.

$$N_d := 72 \quad \text{Número de amortiguadores instalados a la estructura}$$

+

$$x_{dis}(t) := m_e \frac{d^2}{dt^2} \eta(t) \quad \text{Función que describe el movimiento del amortiguador en función del movimiento del edificio.}$$

$$z := 0.45s$$

$$\text{AmplitudI} := m e^{-\frac{d^2}{dz^2} \frac{\eta(z)}{k d \cdot N d}} = -0.885 \text{ m}$$

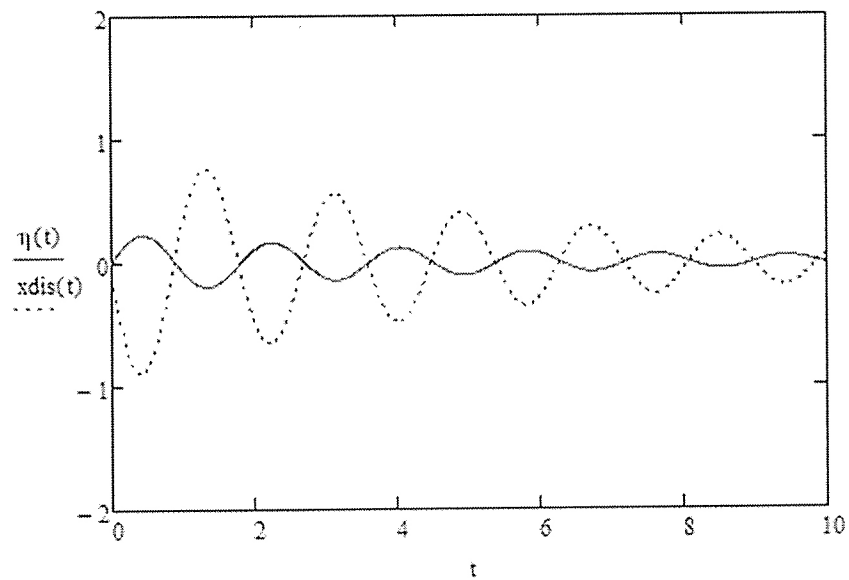
$$A_d := \frac{\text{AmplitudI}}{N d} = -0.012 \text{ m}$$

$$\text{Relacion} := \frac{|A_d|}{0.012 \text{ m}} = 1.025$$

$$\frac{(1.054 \times 10^7 \cdot 10)}{(1.213 \times 10^6)} = 86.892$$

Cantidad de resortes taylor a utilizar equivalentes a la rigidez de los resortes diseñados

Movimiento libre amortiguado de la estructura control vs el amortiguadores Tylor



Desplazamiento del edificio sin el dispositivos y con el dispositivo

Se encuentran los parámetros sísmicos para la estructura con el dispositivo como un sistema.

$$c_{tot} := N_d \cdot c + c_e = 9.819 \times 10^6 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad \text{Coeficiente de amortiguamiento total}$$

$$k_{tot} := N_d \cdot k_d + k = 4.307 \times 10^8 \frac{\text{kg}}{\text{s}^2} \quad \text{Rigidez total}$$

$$m_{tot} := N_d \cdot m_{dis} + m_e = 2.813 \times 10^7 \text{ kg} \quad \text{Masa total}$$

$$\omega_f := \sqrt{\frac{k_{tot}}{m_{tot}}} = 3.913 \frac{1}{\text{s}} \quad \text{Frecuencia final con el dispositivo incluido.}$$

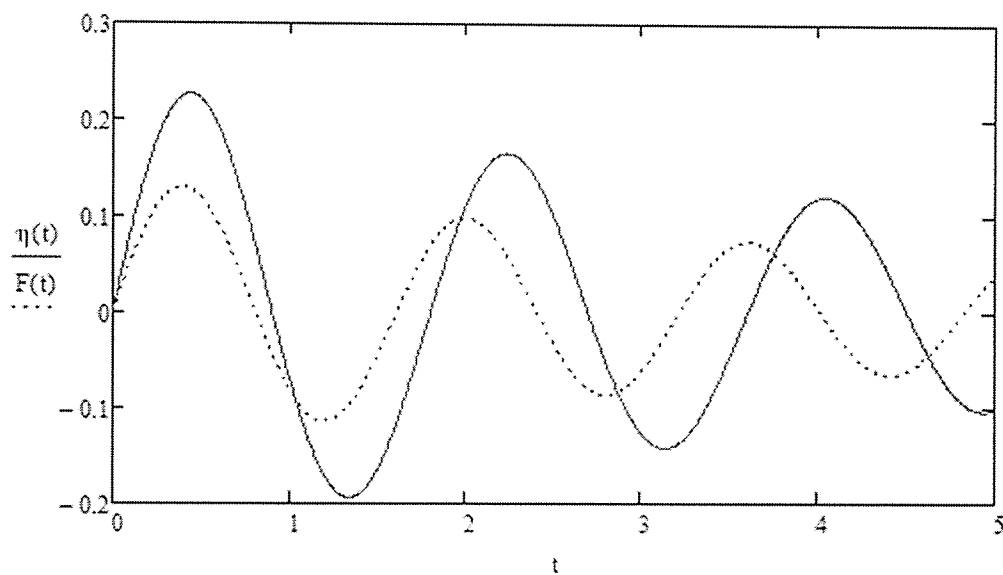
$$T_{\omega\omega} := 2 \frac{\pi}{\omega_f} = 1.606 \text{ s} \quad \text{Periodo de la estructura con los amortiguadores}$$

$$A_{\omega\omega} := 0.14 \text{ m} \quad \text{Desplazamiento máximo en la estructura con el dispositivo}$$

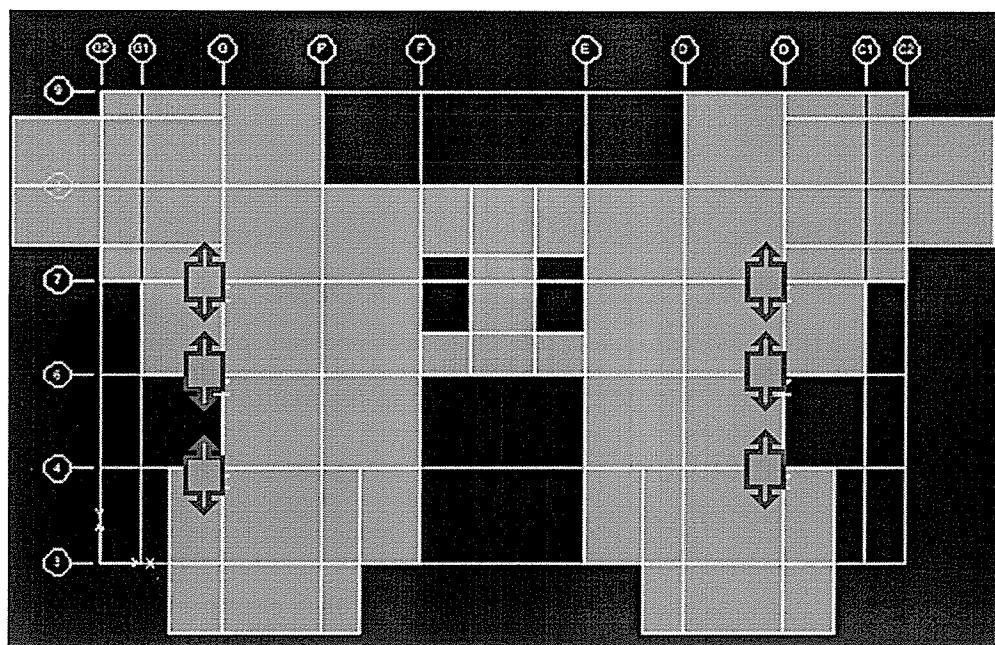
$$\eta(t) := D \cdot \left[e^{-\left(\frac{c_e}{2 \cdot m_e}\right) \cdot t} \cdot \sin(\omega \cdot t + \phi) \right] \quad \text{Funcion desplazamiento de la estructura}$$

$$F(t) := A \cdot \left[e^{-\left(\frac{c_{tot}}{2 \cdot m_{tot}}\right) \cdot t} \cdot \sin(\omega_f \cdot t + \phi) \right] \quad \text{Funcion desplazamiento de la estructura con el dispositivo}$$

Movimiento libre amortiguado de la estructura control vs la estructura con amortiguadores Tylor



Planta de ubicación de los amortiguadores Tylor



Control de derivas por nivel en edificio con 6 amortiguadores Taylor por nivel instalados en los niveles (2,4,6...24)

Nivel	Carga	% de Deriva Elástica por nivel	Deriva Post elástica ($\delta \cdot Cd \cdot h$, en cm.)	Deriva permisible ($\Delta=2\%$ de h)	Desplazamiento por nivel (en cm.)	% ($\delta \cdot Cd / \Delta$)
25	SPECYAGIES	0.1%	2.20	6.40	0.40	34%
24		0.1%	2.60	6.40	0.47	40%
23		0.2%	3.00	6.40	0.55	46%
22		0.2%	3.30	6.40	0.60	51%
21		0.2%	3.60	6.40	0.65	56%
20		0.2%	3.80	6.40	0.69	60%
19		0.2%	4.00	6.40	0.73	63%
18		0.2%	4.20	6.40	0.76	65%
17		0.2%	4.30	6.40	0.78	68%
16		0.3%	4.40	6.40	0.80	69%
15		0.3%	4.60	6.40	0.84	72%
14		0.3%	4.70	6.40	0.85	73%
13		0.3%	4.80	6.40	0.87	75%
12		0.3%	4.90	6.40	0.89	76%
11		0.3%	5.00	6.40	0.91	78%
10		0.3%	5.10	6.40	0.93	79%
9		0.3%	5.20	6.40	0.95	81%
8		0.3%	5.30	6.40	0.96	82%
7		0.3%	5.40	6.40	0.98	84%
6		0.3%	5.50	6.40	1.00	86%
5		0.3%	5.60	6.40	1.02	88%
4		0.3%	5.60	6.40	1.02	88%
3		0.3%	5.50	6.40	1.00	87%
2		0.3%	4.90	6.40	0.89	77%
1	0.1%	2.50	6.40	0.45	39%	
					Promedio	69%

D. Sistema de aislación de base

1. **Descripción de la metodología de análisis.** Únicamente para este dispositivo, se modelará un edificio de 10 niveles, el cual es considerado un edificio de mediana altura. El material a utilizar es concreto. La metodología de análisis que se utiliza es LRFD por sus siglas en inglés (Load Resistance Factor Design) ya que éste se basa en los conceptos de estados límite que se usa para describir una condición en la que una estructura o parte de ella deja de cumplir su función. Se basa principalmente en dos estados:

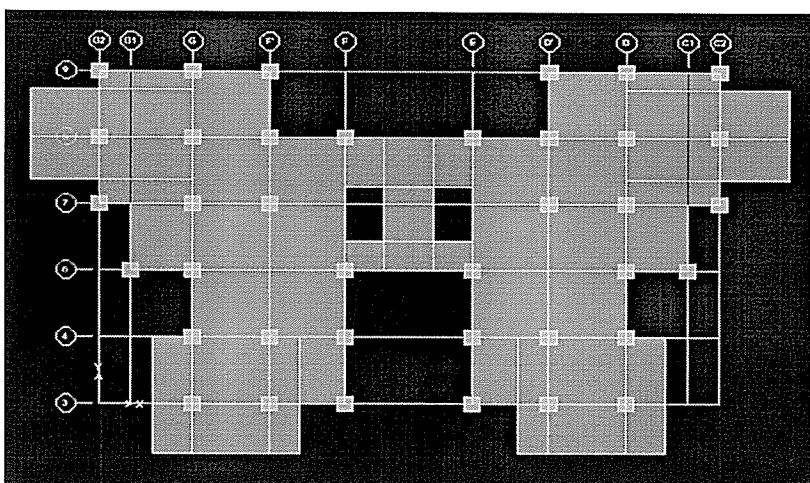
- Estado límite de resistencia: se basa en la seguridad o capacidad de carga de las estructuras e incluyen las resistencias plásticas, de pandeo, de fractura, de fatiga, de volteo, etc.
- Estado límite de servicio: se refiere al comportamiento de las estructuras bajo cargas normales de servicio y tienen que ver con aspectos asociados con el uso y ocupación, tales como; cargas excesivas, deslizamientos, vibraciones y agrietamientos.

El código que se utilizará para las combinaciones de carga es ACI-318 y para el diseño sísmico se utiliza AGIES ya que en este caso, es la norma de seguridad estructural y obras de infraestructura para Guatemala. Lo que se pretende en el modelado es verificar las disminuciones en derivas laterales más no, revisar gravitacionalmente, utilizando dispositivos que aíslen la base de la edificación del suelo y que por lo tanto la energía transmitida a la estructura sea menor. En las siguientes páginas se encontrarán los resultados del edificio de control y del edificio con aislamiento de base.

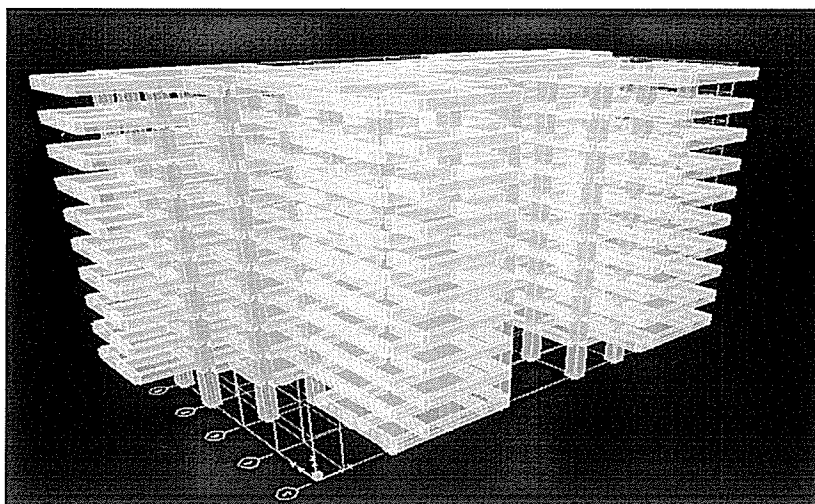
2. **Parámetros y características de la estructura de control a utilizar.** La presente estructura considerada de altura media en Guatemala, debe ser capaz de chequear las cargas dinámicas laterales, de tal forma que se cumplan los requisitos de las normas establecidas y de los usuarios. Para determinar los parámetros necesarios como altura total, peso neto, rigidez de la estructura, frecuencia y periodo de vibración, etc. se utilizará el programa ETABS Nonlinear v9.7.2

El edificio que se va a utilizar para la parte práctica de dicha investigación, como estructura de “control”, es de forma simétrica y cuenta con 38 columnas de 0.65 x0.65m en concreto 5000psi y vigas de 0.40x0.75 m en concreto 3500psi, los apoyos en la base son empotrados. Las áreas por nivel son de 762.24m². Para determinar el espesor de la losa de cada nivel se tomo en cuenta el perímetro de la edificación, dando como resultado una losa de 0.12m con concreto 3500psi. Se asigna diafragmas rígidos a todos los niveles con la finalidad de tener un comportamiento homogéneo en las losas. A continuación se presenta el edificio con vista en planta y 3D:

Vista en planta del edificio.



Vista en 3D del modelo.



3. Cálculos y resultados

$$h_{\text{edificio}} := 32\text{m}$$

$$\frac{g}{\text{seg}^2} := 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$\text{masa}_{\text{edificio}} := 678684\text{kg}$$

Rigidez del edificio (K_s) se calcula:

$$E := 2738460000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \quad \text{Módulo de elasticidad del concreto}$$

$$I_{\text{edificio}} := 869.3 \text{m}^4 \quad \text{Se calcula en AUTOCAD}$$

$$K_s := \frac{3 \cdot g \cdot E \cdot I_{\text{edificio}}}{h_{\text{edificio}}^3} = 2.138 \times 10^9 \frac{\text{kg}}{\text{s}^2}$$

$$\omega := \sqrt{\frac{K_s}{\text{masa}_{\text{edificio}}}} = 17.749 \frac{1}{\text{s}}$$

Frecuencia natural y periodo de vibración de la estructura de control

Condición de amortiguamiento de la estructura de control: se toma en cuenta el 5% de la frecuencia natural para la condición de amortiguamiento

$$\omega_n := \omega \cdot \sqrt{1 - 0.05^2} = 18.883 \frac{1}{\text{s}} \quad C_e := 0.05 \cdot \text{masa}_{\text{edificio}} \cdot \omega_n = 5.647 \times 10^6 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Cálculo del periodo de oscilación del edificio de control

$$\tau := 2 \frac{\pi}{\omega_n} = 0.333\text{s}$$

Ecuación de movimiento libre amortiguado del edificio de control

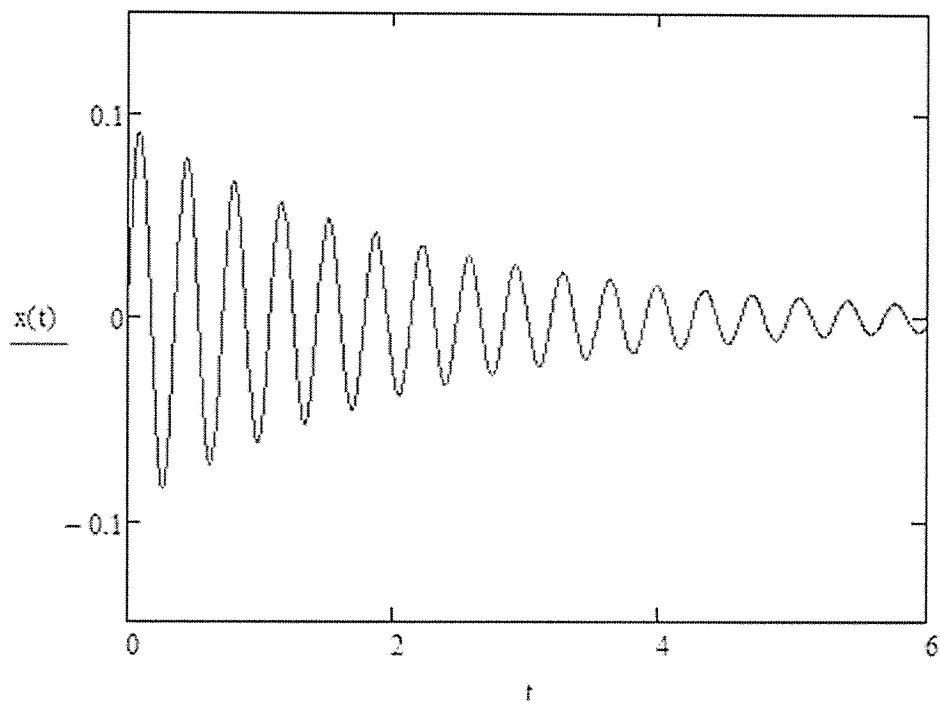
$$\phi := 0$$

La amplitud del movimiento lateral se tomó del programa ETABS:

$$D := 0.095r$$

$$x(t) := D \cdot \left(e^{\frac{-Ce}{2 \cdot \text{masa}_{\text{edificio}} \cdot t}} \cdot \sin(\omega n \cdot t + \phi) \right)$$

Periodo natural y frecuencia natural amortiguada de vibración de la estructura de control



Según el peso propio de la estructura se diseña el aislador de base que soporte la carga vertical, a continuación se muestra la tabla del peso propio de la estructura. El procedimiento es simple, existen tablas con las capacidades de carga vertical que puede llegar a soportar el dispositivo de aislación de base, por lo que es necesario que el peso propio se tenga dimensionales Newton.

Peso propio de la estructura de control.

Section	ElementType	NumPieces	TotalLength	TotalWeight	NumStuds
COL65X65	Column	380.00	1,216.00	1,234.36	
VIGA40X70	Beam	470.00	5,140.00	3,357.25	0
LOSA12	Floor			2,195.24	
			total	6,786.85	

A continuación se muestra el peso de la estructura de control en dimensionales que se pueden manejar para proponer y seleccionar un aislador de base que cumpla con las condiciones de soporte de carga vertical, luego de esto se determina el número de amortiguadores a utilizar.

$$\text{peso}_{\text{newton}} := \text{masa}_{\text{edificio}} \cdot g = 6.658 \times 10^7 \text{ N}$$

$$\text{capacidad}_{\text{aislador}} := 4.5 \cdot 1000000 \text{ N} = 4.5 \times 10^6 \text{ N}$$

$$\text{total}_{\text{aisladores}} := \frac{\text{peso}_{\text{newton}}}{\text{capacidad}_{\text{aislador}}} = 14.795$$

Aunque matemáticamente se necesiten 15 aisladores de base con capacidad de 2.25MN cada uno para cubrir la capacidad de carga vertical de la estructura, se proponen 16 para que se puedan colocar de forma simétrica en la estructura, luego de esto, se calcula la rigidez del aislador.

Características del dispositivo de aislación de base utilizando el programa mathcad:

A continuación se describen los cálculos de los valores característicos del ciclo histerético del aislador de base de goma con núcleo de plomo:

Cálculo de la fuerza característica (CS):

Se propone un diámetro del cilindro de plomo de un dispositivo comercial;

$$\text{dpb} := 100 \text{ mm}$$

Fluencia promedio del plomo:

$$\sigma_{pb} := 10.5 \text{MPa}$$

Se calcula la fuerza característica CS, según Maurer Sohne LRB:

$$c_s := \left(\frac{\pi \cdot d_{pb}^2}{4} \right) \sigma_{pb} = 8.247 \times 10^4 \text{N}$$

Se procede con el cálculo de la rigidez (K) del dispositivo:

Utilizando el módulo de corte del elastómero:

$$\text{modulo}_{\text{corte}} := 0.6 \text{MPa}$$

Se selecciona el espesor del elastómero:

$$\text{espesor}_{\text{goma}} := 96 \text{mm}$$

Área de goma del dispositivo según tabla de características del dispositivo:

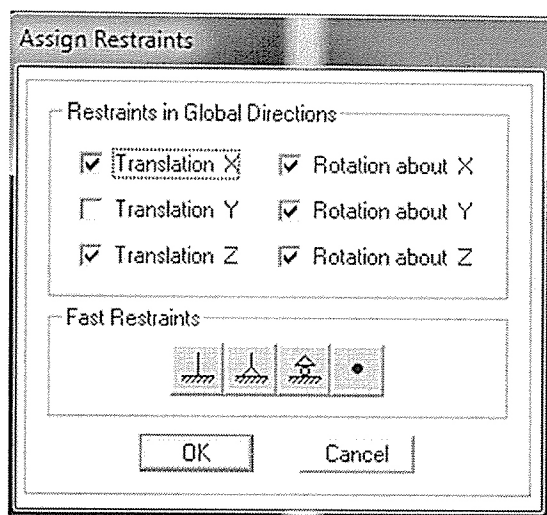
$$A_r := 580 \text{mm} \cdot 520 \text{mm} = 0.302 \text{m}^2$$

Según Maurer Sohne LRB, la rigidez K del dispositivo es:

$$k_{\text{dispositivo}} := \frac{\text{modulo}_{\text{corte}} \cdot A_r}{\text{espesor}_{\text{goma}}} = 1.885 \times 10^6 \frac{\text{kg}}{\text{s}^2}$$

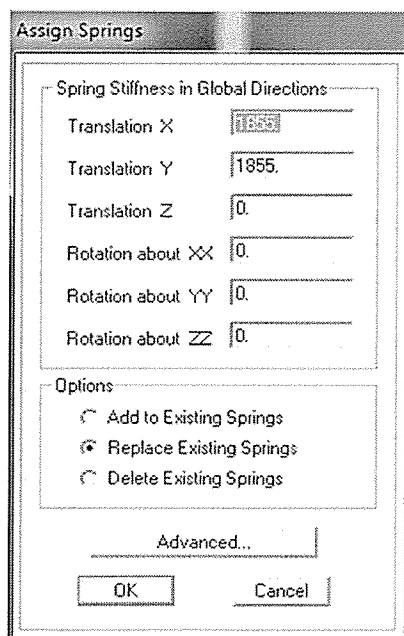
Utilizando la rigidez del sistema de aislación de base encontrada anteriormente, se procede a tomar el edificio de control y se asigna en la base apoyos simples, los cuales emulan que la base de la estructura sea aislada para que los resortes que se implementan actúen como aisladores de base haciendo así que, las derivas del espectro sísmico en el eje y se vean disminuidas.

Asignación libertad de movimiento en el eje y.



El proceso para asignar las rigideces de los aislantes de base se hace en la barra de tareas de ETABS en las direcciones globales de x y y la magnitud de la rigidez en toneladas:

Se asigna la rigidez calculada del dispositivo de aislación de base.



Según el análisis que se realizó en ETABS, se despliega la tabla de resultados del edificio de control con sus respectivos desplazamientos y las derivas utilizando la carga espectral dinámica en el eje y según AGIES, de todos los niveles de la edificación, esta deriva no debe sobrepasar la deriva máxima permisible que se calculó determinando el 2% de la altura por nivel. Hay que tomar en cuenta que los apoyos en la base del edificio de control son empotrados ya que de este modo se modela la realidad constructiva.

DERIVAS DEL EDIFICIO DE CONTROL SIN DISPOSITIVO						
Nivel	Carga	% de Deriva Elástica por nivel	Deriva Post elástica ($\delta \cdot C_d \cdot h$, en cm.)	Deriva permisible ($\Delta = 2\%$ de h)	Desplazamiento por nivel (en cm.)	% ($\delta \cdot C_d / \Delta$)
10	SPECYAGIES	0.1%	2.20	6.40	0.40	34%
9		0.2%	3.30	6.40	0.60	51%
8		0.2%	4.30	6.40	0.78	66%
7		0.3%	5.10	6.40	0.93	79%
6		0.3%	5.80	6.40	1.05	90%
5		0.4%	6.40	6.40	1.16	100%
4		0.4%	7.00	6.40	1.27	110%
3		0.4%	7.40	6.40	1.35	116%
2		0.4%	7.10	6.40	1.29	110%
1		0.2%	3.80	6.40	0.69	59%
						81.66%

DERIVAS DEL EDIFICIO DE CONTROL CON EL DISPOSITIVO						
Nivel	Carga	% de Deriva Elástica por nivel	Deriva Post elástica ($\delta \cdot Cd \cdot h$, en cm.)	Deriva permisible ($\Delta=2\%$ de h)	Desplazamiento por nivel (en cm.)	% ($\delta \cdot Cd / \Delta$)
10	SPECYAGIES	0.1%	1.70	6.40	0.31	27%
9		0.1%	2.60	6.40	0.47	41%
8		0.2%	3.50	6.40	0.64	54%
7		0.2%	4.20	6.40	0.76	66%
6		0.3%	4.80	6.40	0.87	76%
5		0.3%	5.40	6.40	0.98	84%
4		0.3%	5.80	6.40	1.05	91%
3		0.3%	6.10	6.40	1.11	95.95%
2		0.3%	5.90	6.40	1.07	92%
1		0.2%	3.20	6.40	0.58	51%
						67.74%

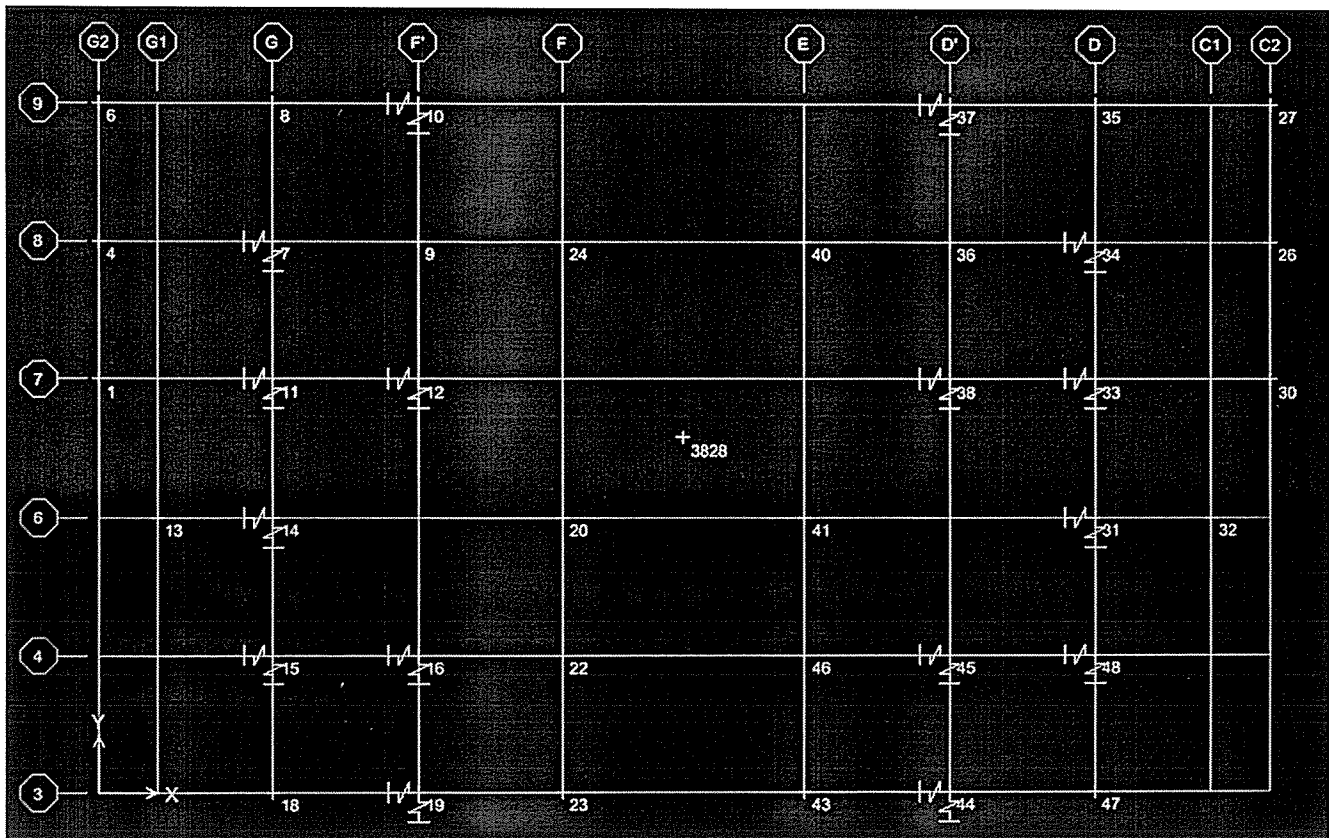
Derivas del edificio con sistema de aislación de base.

Nivel	corte basal con dispositivo	corte basal sin dispositivo
10	105.260	146.560
9	201.800	258.320
8	279.890	340.470
7	341.510	401.260
6	390.890	449.740
5	432.830	494.160
4	471.520	539.330
3	509.720	584.450
2	548.090	622.810
1	585.370	643.840

Comparación del corte basal del edificio de control con el edificio con sistema de aislación de base:

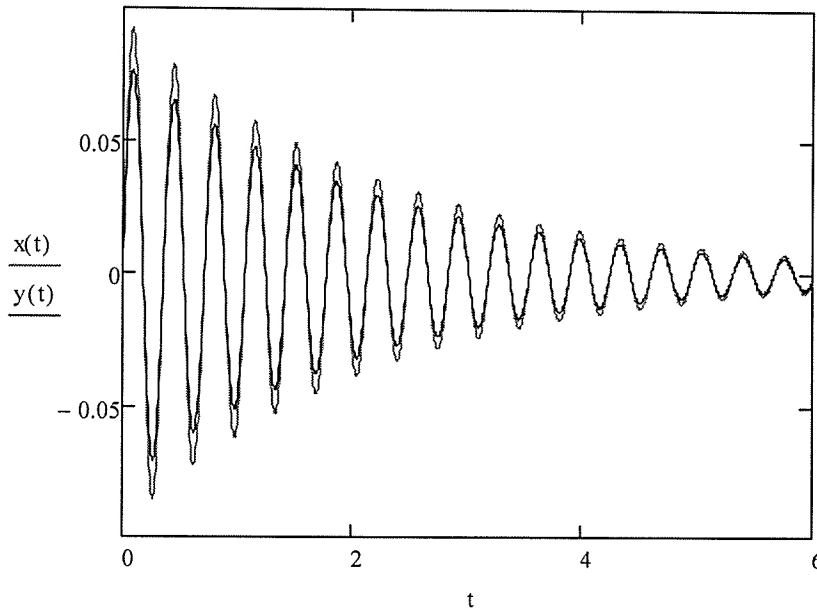
La distribución de los 16 amortiguadores, como se menciona anteriormente, se hizo de forma simétrica, tomando en cuenta que los puntos próximos a los voladizos generan torsión afectando de manera directa las derivas:

Distribución de los aisladores de base.



Con los resultados anteriores, se puede obtener la grafica comparativa entre las dos frecuencias de vibración natural entre el edificio de control y el edificio con el sistema de aislación de base.

Gráfica comparativa entre frecuencia de vibración del edificio de control y el edificio con el sistema de aislación de base.



E. Sistema de amortiguamiento de masa sintonizada

1. Procedimiento del análisis

Paso 1. Diseño del dispositivo

Para el diseño del dispositivo se deben conocer las relaciones esenciales que determinan sus parámetros:

- La masa es un porcentaje de la masa total del edificio, la cual es definida a criterio del diseñador. La masa no debe exceder la capacidad de carga de la estructura que la soporta así como debe tomar en consideración la limitación de espacio que hay en el edificio.
- La rigidez del péndulo es un cálculo que depende directamente de la frecuencia elevada al cuadrado por la masa del dispositivo. En este punto es importante

tomar en cuenta que la frecuencia del dispositivo debe ser igual a la de la edificación para cumplir con la sintonización del sistema.

- El amortiguamiento del dispositivo es una propiedad propia del mismo que puede ser controlada mediante la instalación de amortiguadores que controlen el desplazamiento de la masa para que esta no exceda los límites de espacio de la estructura.

Con estos parámetros diseñados se puede construir la ecuación de movimiento del amortiguador que es dependiente de la ecuación de movimiento de la estructura. Como se podrá observar en los resultados , el movimiento relativo del dispositivo con respecto a la estructura es exactamente igual en período y en sentido contrario al de la estructura. Este movimiento es el que contrarresta los efectos del sismo y se puede observar que el péndulo tiende a moverse más con respecto a la estructura.

Paso 2. Evaluación de la contribución del dispositivo.

Una vez se ha realizado el análisis de cuánta masa y rigidez incrementan en la estructura por causa del dispositivo se puede modelar el comportamiento total de la estructura con los datos completos. Esto se obtiene mediante una nueva ecuación de movimiento en la cual los parámetros del dispositivo se ingresan en interacción con la estructura dando como resultado una ecuación de movimiento resultante amortiguada.

Paso 3. Chequeo de derivas

Finalmente, al tener diseñado el dispositivo y se tiene sus propiedades mecánicas, éstas son modeladas nuevamente en Etabs mediante la simulación de resortes en la parte superior de la estructura con valores de rigidez iguales a las del dispositivo diseñado. Las derivas en el edificio, sin dispositivo, no se han controlado por lo que se obtienen los datos de derivas con el dispositivo y se observa en cuanto son reducidas.

2. Cálculos y resultados

Paso 1: Con estos parámetros se procede a realizar un diseño del dispositivo con base en los requerimientos de la estructura.

Dinámica estructural del dispositivo.

Diseño del dispositivo

$\mu := 0.0215$ % de masa del dispositivo

$m_d := \mu \cdot M$
 $m_d = 6.328 \times 10^5 \text{ kg}$ Masa del dispositivo

$\gamma = 2400 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ Peso específico del concreto

Volumen := $\frac{m_d}{\gamma}$ ----- Volumen del dispositivo

Volumen = 263.649 m^3

Ancho := 7.5 m Ancho del dispositivo

Largo := 1.5 m Largo del dispositivo

Paso 2: Ya con los datos del sistema completo que toma en cuenta la estructura más el aumento de rigidez proporcionada por el dispositivo, se obtiene la dinámica estructural completa con su ecuación de movimiento

Dinámica estructural del sistema completo.

Datos finales del sistema

$$M_t := M + m_x$$

Masa total del sistema

$$M = 2.812 \times 10^7 \text{ kg}$$

$$K_t := K + k_x$$

Rigidez total del sistema

$$K_t = 3.51 \times 10^8 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$$

$$\omega_{nt} := \sqrt{\left(\frac{K_t}{M_t}\right)}$$

Frecuencia natural del sistema

$$\omega_{nt} = 3.494 \text{ Hz}$$

$$C_c := 2 \cdot M \cdot \omega_{nt}$$

$$C_c = 1.965 \times 10^8 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Amortiguamiento total de la estructura

$$C_s = 0.05 \cdot C_c$$

$$C_s = 9.826 \times 10^6 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$\omega_{dt} := \omega_{nt} \cdot \sqrt{1 - \left[\left(\frac{C_s}{C_c}\right) + \%c\right]^2}$$

Frecuencia amortiguada

$$\omega_{dt} = 3.489 \text{ Hz}$$

$$T_t := \frac{2 \cdot \pi}{\omega_{dt}}$$

Periodo final de la estructura

$$T_t = 1.801 \text{ s}$$

Determinación de la ecuación de movimiento de la estructura

$$c := e^{\left[\frac{-[(Cs+cx)Tt]}{2 \cdot Mt \cdot 4} \right]}$$

$$c = 0.921$$

$$d := \omega dt \cdot \frac{Tt}{4}$$

$$d = 1.571$$

$$\phi := \text{asin}(1) - d$$

+

$$\phi = 0$$

$$A := 0.1627\text{m}$$

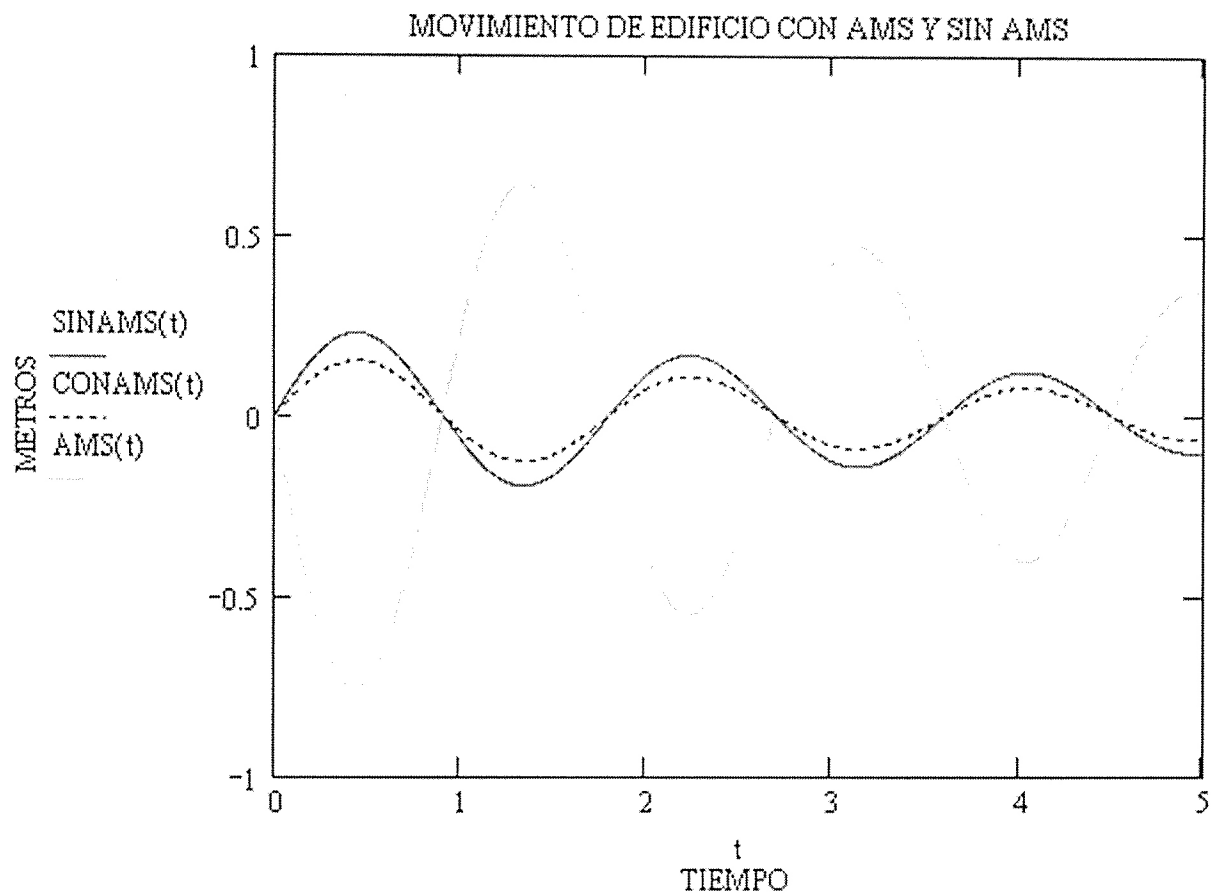
Ecuación de movimiento resultante de la estructura con el dispositivo

$$y(t) := A \cdot e^{-\frac{(Cs+cx) \cdot t}{2 \cdot Mt}} \cdot \sin(\omega dt \cdot t + \phi)$$

$$y(t) \rightarrow .1627 \cdot \text{m} \cdot \exp\left[-1.8236463733385785165 \cdot \left(\frac{1}{s}\right)^2 \cdot t\right] \cdot \sin\left[3.4887435435900818732 \cdot \left(\frac{1}{s}\right)^2 \cdot t\right]$$

Una vez obtenidas las ecuaciones que describen el movimiento de la estructura, éstas pueden ser graficadas y se puede observar la reducción en los desplazamientos en el último nivel del edificio. Además se grafica el movimiento relativo del dispositivo con respecto a la estructura.

**Desplazamientos de la estructura con y sin el sistema de amortiguamiento,
movimiento del amortiguamiento con respecto al edificio.**



Paso 3: Ya con el sistema diseñado y conociendo sus parámetros, el dispositivo se modela en Etabs como una serie de resorte de igual rigidez que la del dispositivo para determinar el control de derivas y observar los efectos del sistema antisísmico en la estructura. El control de derivas se realizó en el eje débil de la estructura el cual es el eje y.

Tabla comparativa de derivas de sismo en el eje débil del edificio sin el AMS

DERIVAS SIN EL DISPOSITIVO						
Nivel	Carga	% de Deriva Elástica por nivel	Deriva Post elástica ($\delta \cdot C_d \cdot h$, en cm.)	Deriva permisible ($\Delta=2\%$ de h)	Desplazamiento por nivel (en cm.)	% ($\delta \cdot C_d / \Delta$)
25	SPECYAGIES	0.1%	2.60	6.40	0.47	39.88%
24		0.2%	3.00	6.40	0.55	46.64%
23		0.2%	3.40	6.40	0.62	53.76%
22		0.2%	3.90	6.40	0.71	60.25%
21		0.2%	4.20	6.40	0.76	65.92%
20		0.3%	4.50	6.40	0.82	70.84%
19		0.3%	4.80	6.40	0.87	75.13%
18		0.3%	5.10	6.40	0.93	78.98%
17		0.3%	5.30	6.40	0.96	82.45%
16		0.3%	5.50	6.40	1.00	85.61%
15		0.3%	5.70	6.40	1.04	88.55%
14		0.3%	5.80	6.40	1.05	91.30%
13		0.3%	6.00	6.40	1.09	93.83%
12		0.4%	6.20	6.40	1.13	96.17%
11		0.4%	6.30	6.40	1.15	98.37%
10		0.4%	6.40	6.40	1.16	100.38%
9		0.4%	6.50	6.40	1.18	102.27%
8		0.4%	6.70	6.40	1.22	104.06%
7		0.4%	6.80	6.40	1.24	105.74%
6		0.4%	6.90	6.40	1.25	107.28%
5		0.4%	6.90	6.40	1.25	108.41%
4		0.4%	6.90	6.40	1.25	108.46%
3		0.4%	6.70	6.40	1.22	105.46%
2		0.3%	5.90	6.40	1.07	92.95%
1		0.2%	3.00	6.40	0.55	46.28%
Promedio						84.36%

CON EL DISPOSITIVO						
Nivel	Carga	% de Deriva Elástica por nivel	Deriva Post elástica ($\delta \cdot Cd \cdot h$, en cm.)	Deriva permisible ($\Delta=2\%$ de h)	Desplazamiento por nivel (en cm.)	% ($\delta \cdot Cd / \Delta$)
25	SPECYAGIES	0.1%	1.2	6.40	0.22	19.36%
24		0.1%	1.5	6.40	0.27	23.27%
23		0.1%	1.7	6.40	0.31	26.57%
22		0.1%	1.9	6.40	0.35	30.14%
21		0.1%	2.2	6.40	0.40	33.91%
20		0.1%	2.4	6.40	0.44	37.76%
19		0.2%	2.7	6.40	0.49	41.80%
18		0.2%	3	6.40	0.55	46.15%
17		0.2%	3.3	6.40	0.60	50.79%
16		0.2%	3.6	6.40	0.65	55.80%
15		0.2%	3.9	6.40	0.71	61.05%
14		0.2%	4.2	6.40	0.76	66.30%
13		0.3%	4.6	6.40	0.84	71.39%
12		0.3%	4.9	6.40	0.89	76.12%
11		0.3%	5.1	6.40	0.93	80.41%
10		0.3%	5.4	6.40	0.98	84.29%
9		0.3%	5.6	6.40	1.02	87.75%
8		0.3%	5.8	6.40	1.05	90.94%
7		0.3%	6	6.40	1.09	93.89%
6		0.4%	6.2	6.40	1.13	96.53%
5		0.4%	6.3	6.40	1.15	98.70%
4		0.4%	6.4	6.40	1.16	99.77%
3		0.4%	6.3	6.40	1.15	97.85%
2		0.3%	5.6	6.40	1.02	86.82%
1		0.2%	2.8	6.40	0.51	43.40%

64.03%

Se revisa la el corte basal de la estructura para determinar el porcentaje de reducción en el mismo

Corte basal del edificio sin el AMS

Story Shears

Edit View

Story Shears

Story	Load	Loc	P	VX	VY	T	MX	MY
STORY9	SPECYAGIES	Bottom	0,00	0,01	1326,26	32831,918	44782,810	0,032
STORY8	SPECYAGIES	Top	0,00	0,01	1369,76	34122,578	44782,810	0,032
STORY8	SPECYAGIES	Bottom	0,00	0,01	1369,76	34122,578	48375,087	0,014
STORY7	SPECYAGIES	Top	0,00	0,01	1416,30	35483,919	48375,087	0,014
STORY7	SPECYAGIES	Bottom	0,00	0,01	1416,30	35483,919	52067,878	0,019
STORY6	SPECYAGIES	Top	0,00	0,00	1466,19	36918,973	52067,878	0,019
STORY6	SPECYAGIES	Bottom	0,00	0,00	1466,19	36918,973	55871,879	0,014
STORY5	SPECYAGIES	Top	0,00	0,01	1518,60	38404,257	55871,879	0,014
STORY5	SPECYAGIES	Bottom	0,00	0,01	1518,60	38404,257	59799,055	0,010
STORY4	SPECYAGIES	Top	0,00	0,01	1571,02	39880,441	59799,055	0,010
STORY4	SPECYAGIES	Bottom	0,00	0,01	1571,02	39880,441	63660,661	0,028
STORY3	SPECYAGIES	Top	0,00	0,01	1619,04	41246,617	63660,661	0,028
STORY3	SPECYAGIES	Bottom	0,00	0,01	1619,04	41246,617	68064,070	0,036
STORY2	SPECYAGIES	Top	0,00	0,01	1656,41	42361,325	68064,070	0,036
STORY2	SPECYAGIES	Bottom	0,00	0,01	1656,41	42361,325	72408,684	0,022
STORY1	SPECYAGIES	Top	0,00	0,01	1676,12	43057,098	72408,684	0,022
STORY1	SPECYAGIES	Bottom	0,00	0,01	1676,12	43057,098	76882,274	0,012

OK

Corte basal del edificio con el AMS

Story Shears

Edit View

Story Shears

Story	Load	Loc	P	VX	VY	T	MX	MY
STORY9	SPECYAGIES	Bottom	0,00	17,44	1177,63	29286,640	21274,799	948,273
STORY8	SPECYAGIES	Top	0,00	17,44	1234,03	30817,968	21274,799	948,273
STORY8	SPECYAGIES	Bottom	0,00	17,44	1234,03	30817,968	24252,808	1004,034
STORY7	SPECYAGIES	Top	0,00	17,44	1289,71	32349,640	24252,808	1004,034
STORY7	SPECYAGIES	Bottom	0,00	17,44	1289,71	32349,640	27505,188	1059,817
STORY6	SPECYAGIES	Top	0,00	17,44	1346,27	33909,351	27505,188	1059,817
STORY6	SPECYAGIES	Bottom	0,00	17,44	1346,27	33909,351	31001,350	1115,592
STORY5	SPECYAGIES	Top	0,00	17,44	1403,76	35490,698	31001,350	1115,592
STORY5	SPECYAGIES	Bottom	0,00	17,44	1403,76	35490,698	34720,536	1171,367
STORY4	SPECYAGIES	Top	0,00	17,44	1460,21	37044,004	34720,536	1171,367
STORY4	SPECYAGIES	Bottom	0,00	17,44	1460,21	37044,004	38647,524	1227,163
STORY3	SPECYAGIES	Top	0,00	17,44	1511,42	38471,754	38647,524	1227,163
STORY3	SPECYAGIES	Bottom	0,00	17,44	1511,42	38471,754	42766,899	1282,950
STORY2	SPECYAGIES	Top	0,00	17,44	1551,07	39631,149	42766,899	1282,950
STORY2	SPECYAGIES	Bottom	0,00	17,44	1551,07	39631,149	47056,942	1338,716
STORY1	SPECYAGIES	Top	0,00	17,44	1571,97	40350,304	47056,942	1338,716
STORY1	SPECYAGIES	Bottom	0,00	17,44	1571,97	40350,304	51485,378	1394,484

OK

Tabla 10. Tabla Resumen comparativo entre edificio sin dispositivo de masa sintonizada y con dispositivo de masa sintonizada.

RESUMEN	SIN AMS	CON AMS	DIFERENCIA	% REDUCCIÓN
Corte basal (Ton)	1676.12	1571.97	104.15	6%
Desplazamiento del piso superior (m)	0.245	0.1627	0.0823	34%
Promedio de relación entre derivas reales y permisibles para sismo en eje débil (%)	84.36%	64.03%	20.33%	24.10%
Promedio de relación entre derivas reales y permisibles para viento en eje débil	1.82%	0.87%	0.95%	52.20%

V. DISCUSIÓN

A. Amortiguadores de líquido sintonizado

Como pre diseño se estimaron dimensiones de columnas de 95cm de cada lado, éstas proveían cierta rigidez a la estructura, pero no la suficiente para no sobrepasar la deriva última permisible, por lo tanto se aplicó el sistema de amortiguamiento líquido sintonizado para solucionar este problema.

En cuanto a los resultados obtenidos en la disminución de las derivas por el espectro sísmico de la carga dinámica en la dirección “y” se observaron notables mejoras. El porcentaje mostrado en la última columna de las tablas de derivas (ver marco práctico) muestra la relación entre las derivas post-elástica y la última permisible; es decir, nos dice qué tan mal o bien están. En el edificio control sin el dispositivo, el promedio de estos porcentajes es de 84.36%, sin embargo de los niveles 3 al 9 la deriva pasa la última permitida. En el edificio con el dispositivo de ALS este promedio fue de 71.93%, y todos los niveles estaban dentro del rango permitido. Por lo tanto este sistema solucionó el problema de derivas en un 14.7% para este edificio control. Aunque vale la pena mencionar que hubo cierta dificultad en controlar las derivas en los voladizos laterales ya que estos generaban casos torsionales; para contrarrestar esto se ubicaron un poco más de tanques hacia estos voladizos (ver Ilustración 45, se colocaron más resortes cerca de los voladizos laterales.)

El diseño de los tanques de agua estaba regido por la ecuación C-9 la cual, como se puede observar, estaba regida por tres variables, la frecuencia, el radio del tanque y la altura de agua. Básicamente la dificultad del diseño fue de igualar esta frecuencia a la del edificio control tomando en cuenta las condiciones de espacio y de carga última permitida en el nivel. Si no se tomaran en cuenta estas dos restricciones entonces el sistema ALS podría llegar a reducir las derivas hasta volverlas cero, pero esto no es viable. Por lo tanto este sistema de amortiguamiento está limitado por el área de la planta del edificio. Si se tratara de un edificio bajo pero con un área transversal

relativamente grande entonces este dispositivo tendría oportunidad para dar aún mejores resultados; se podría colocar el doble o triple de tanques.

Un punto muy interesante observado en el diseño de los tanques fue que si se incrementara la frecuencia natural del edificio entonces el radio de los tanques tendría que disminuir casi proporcionalmente a lo que aumentó la frecuencia y la altura de agua tendría que aumentar muy levemente. Sin embargo, como el radio es menor aumenta la cantidad de tanques. Esto nos dice que para edificios más bajos, en donde la frecuencia es mayor, se puede llegar a tener hasta un mayor volumen de agua. Se hizo la prueba de eliminar 5 niveles al edificio control para aumentar la frecuencia natural y se observó una mejora en el control de derivas ya que la cantidad de agua fue levemente mayor para derivas de menor magnitud.

Por otro lado si se disminuyera la frecuencia se tendría que aumentar el radio y disminuir la altura de agua (caso contrario al anterior). Por lo tanto se tendría que contar con una planta mayor a medida que se aumenta la altura del edificio; generalmente los edificios más altos tienen aéreas más grandes aunque hay excepciones. También se hizo la prueba aumentando 5 niveles más al control y en efecto, como el área de planta es constante, el efecto en las derivas fue menor y la eficiencia disminuyó.

Estas dos variantes de altura del edificio control (en Etabs) no se muestran en este trabajo ya que no era parte de los objetivos, sin embargo, da un idea general del campo de aplicación de este dispositivo. De cualquier forma, se puede comparar lo dicho en los dos párrafos anteriores al ingresar valores para "a" y "h", y observar los resultados de los valores de " ω " en la ecuación C-9.

La curva que compara el movimiento dinámico del edificio versus el del agua en los tanques muestra claramente que el agua se mueve a la misma frecuencia, pero tiene un desfase creado pasivamente por el concepto de aceleración lineal, de mecánica de fluidos. Esto provoca que el movimiento sea sintonizado; de tal forma que disminuye el desplazamiento lateral efectivamente, como se puede observar en la gráfica que compara el movimiento del edificio control sin el dispositivo versus el del mismo edificio con el dispositivo de amortiguamiento.

En cuanto a la carga de viento, una simple observación a las tablas de derivas indica que no son predominantes sobre el sismo. Lo que importa es que el porcentaje

de reducción al colocarle el dispositivo fue del 22.1%, aunque en realidad la carga de viento no solicitó ningún tipo de amortiguamiento adicional al inherente de la estructura. De cualquier forma, el dispositivo tuvo un impacto más grande sobre la carga de viento que sobre la carga de sismo (reducción de 22.1% versus 14.7%).

Una variable que no se modificó fue la densidad del líquido, ya que no hubo necesidad para este edificio. Aunque en otros escenarios puede convenir aumentar la densidad, por ejemplo en espacios más reducidos, siempre y cuando la carga distribuida generada no sobrepase cierto límite permisible.

B. Amortiguadores laterales

Los resultados han demostrado la efectividad de los amortiguadores laterales en el control de las derivas producidas por la carga sísmica. Este método demuestra que mediante la disipación de la energía por medio de la deformación de un amortiguador se pueden tener configuraciones estructurales más livianas. Además del hecho de reducir la masa del edificio, estos dispositivos trabajan bajo cualquier carga que produzca vibración según su calibración.

Para este trabajo se tomó como premisa un edificio llamado control el cual fue configurado intencionalmente para que sus derivas superaran las permisibles, esto con el objetivo de demostrar la reducción de las derivas con la instalación de los dispositivos. Los dispositivos fueron modelados idealizando el amortiguador como un resorte, y por ende utilizando la Ley de Hooke para los cálculos. No obstante, el comportamiento del dispositivo fue modelado en función del movimiento libremente amortiguado de la estructura. Esto se logró mediante la integración de la ecuación de la ley de Hooke con la solución a la ecuación de movimiento, lo que permitió generar una función que depende del tiempo que dependía directamente de factores como lo son las rigideces, la masa y los coeficientes de amortiguamiento tanto de la estructura como del dispositivo en cuestión.

El trabajo consistió en determinar el coeficiente de rigidez de un resorte para absorber una deformación tal que permitiera que las derivas fueran menores a las permisibles. Esto se llevó a cabo realizando un análisis de las fuerzas externas (Sismo) por nivel, las cuales se determinaron por medio del método de distribución de corte

vertical según AGIES. Para encontrar el k del resorte se tomó el nivel con mayor deriva con el objetivo que el coeficiente a encontrar fuera el crítico en el edificio. De igual manera se hizo una reducción en la deformación del amortiguador la cual no debe de ser la misma que el desplazamiento diferencial del nivel, ya que de ser así el amortiguador no ejercería una resistencia representativa. Utilizando las condiciones anteriores se encontró la rigidez por nivel suponiendo una deformación para el amortiguador en el nivel crítico.

Una vez se obtuvo la rigidez necesaria para controlar las derivas en el nivel crítico se distribuyó en dos dispositivos los cuales fueron analizados en ETABS en diferentes configuraciones. Todas las configuraciones probadas en el software tenían como parámetros principales la simetría y la cercanía al centro de masa del nivel con el objetivo de ser más eficaces en cuanto a la disipación de la energía y no interferir con la torsión del edificio. De igual manera se intentó mantener uniformidad a lo largo de la estructura, lo que en el primer caso causó una reducción de las derivas del 52%, cuando únicamente se necesitaba un 15% de reducción. Sin embargo el sistema se optimizó con el objetivo de reducir las derivas al rango permisible utilizando la menor cantidad de dispositivos y la configuración más acertada. A diferencia del primer caso en donde se utilizaron 50 amortiguadores con un $k_d = 10.54$ KN/mm en el caso optimizado únicamente se utilizaron 10 dispositivos con el mismo k_d , pero distribuidos en únicamente en 5 pisos, reduciendo las derivas en un 24% lo que permitió que la estructura estuviera controlada lateralmente.

Con el objetivo presentar un diseño viable al contexto se utilizaron parámetros de un amortiguador viscos Taylor comercial para controlar las derivas del edificio. Para ello se relacionaron las rigideces de los dispositivos en cuestión y se obtuvo que eran necesarios 72 dispositivos Taylor. Estos dispositivos fueron instalados en los niveles pares (2,4,6...24), con una configuración por planta que incluyen 6 amortiguadores por nivel. Utilizando esta configuración se obtuvo una reducción del 20% por lo que el sistema quedó optimizado al 90% de la deriva permisible en el nivel crítico.

Un dato importante observado en el análisis de la estructura es el hecho que los niveles intermedios son los más castigados por el sismo. Esto se debe a las condiciones de empotramiento que se introdujeron como parte del diseño en concreto del edificio. Esta parte fue fundamental para la ubicación de los dispositivos debido a que

controlando las derivas en este punto reduce considerablemente el comportamiento de los niveles superiores.

Para el análisis y diseño de este proyecto se despreció el aporte producido por el arriostramiento ya que en este tipo de dispositivos funcionan más como un medio para transmitir las fuerzas hacia los amortiguadores, no obstante su rigidez si afecta al sistema. Por el otro lado se utilizó un amortiguador que debido a su longitud no necesita las riostras ya que se conecta de nudo a nudo.

Cabe mencionar que el análisis realizado está generalizado para todo tipo de amortiguador (Fricción, Visco elástico, etc) una vez se pueda idealizar como resortes. No obstante luego de escoger un tipo de dispositivo es necesario calcular los parámetros específicos de cada uno como por ejemplo la velocidad del pistón o el coeficiente de amortiguamiento del líquido.

Debido a que el análisis en este trabajo únicamente consistió en la estabilización lateral de la estructura y la falta disponibilidad de precios reales de los dispositivos no se pudo llevar a cabo un análisis económico del costo-beneficio. Debido a ello no se puede concluir que es un método económicamente viable, no obstante está demostrado que sí lo es técnicamente. Es importante mencionar que existe una gran cantidad de edificios y puentes alrededor del mundo que cuentan con sistemas de este tipo. (ver Anexos)

C. Aisladores de base

En la parte práctica se hace el pre diseño de una estructura que se puede utilizar como “estructura de control” esto significa que se tomará como una edificación base para determinar las diferencias de éste, con el mismo edificio pero utilizando amortiguadores elastómeros con núcleo de plomo para hacer efectivas las reducciones tanto en el corte basal, como en las derivas de los niveles. La calibración del sismo dinámico se determinó según AGIES.

Las características mecánicas del dispositivo que se propone son calculadas haciendo uso de fórmulas establecidas bajo estudios teóricos. Dichas fórmulas toman en cuenta el diámetro del cilindro de plomo ubicado en la parte central del aislador, el modulo de elasticidad del elastómero y espesor de las planchas de goma del dispositivo. Se recomienda que a la hora del ensamblaje se puede utilizar un núcleo de

plomo con un aumento del 1% de la capacidad volumétrica del aislador haciendo así que una de las propiedades características cuando es sometido a corte en el eje horizontal, el plomo es forzado a interactuar con las placas de acero haciendo que actúe puramente en corte. Otra característica importante es que el esfuerzo a fluencia es relativamente bajo, por lo que presenta un comportamiento de un sólidoelasto-plástico.

La rigidez de la “estructura de control” es determinada de forma práctica utilizando el módulo de elasticidad del concreto, la inercia y la altura del edificio. Con estos parámetros se puede determinar la frecuencia natural amortiguada con un coeficiente del 5% según se establece en el código de la integración de la carga sísmica AGIES y el periodo de vibración de la estructura. La amplitud del movimiento lateral es tomada de las tablas de las derivas acumuladas del edificio con ayuda del programa ETABS. Dicha amplitud de 0.09m es considerada como el desplazamiento absoluto entre la base y el último nivel.

El peso total de la estructura determina el primer paso para el diseño del tipo de aislador que se va a utilizar. El dispositivo propuesto presenta una capacidad de carga de 4.5 MN. El paso de proponer un dispositivo aislador toma en cuenta la cantidad y la distribución de los mismos en el sistema. Aunque en el cálculo teórico se determinó que se deben utilizar 15 dispositivos de aislación, se utilizaron 16 con la finalidad de hacer la distribución de forma simétrica. Los 16 dispositivos cumplen con la condición de transmisión de carga vertical del peso propio de la estructura de control y se determinó que cumplen con una demanda/capacidad del 92%.

En el modelado virtual se restringe el movimiento en todas las direcciones exceptuando en el eje y, ya que el fin de este estudio es controlar las derivas del edificio con el sistema de aislación de base. Luego de asignar la rigidez de 1855 ton/seg con la función de “springs” en los puntos de la estructura aislada, se procedió a observar los cambios en los desplazamientos del edificio con y sin el aislamiento de base. Estos resultados demostraron que el desplazamiento máximo de la estructura de control y la estructura aislada variaron de 0.095m a 0.079m dando así un resultado satisfactorio de reducción de desplazamientos del 17%. También se compararon las magnitudes del corte basal para ambos casos donde el porcentaje de reducción fue del 9%.

Aunque técnicamente se demuestra que éste es un sistema que funciona propiamente para este tipo de estructura, no se pudo determinar la viabilidad financiera debido a la falta de información en cuanto al costo del dispositivo seleccionado. Sin

embargo, existen edificaciones y puentes en países desarrollados que han adoptado este sistema, ya que como el marco teórico indica son dispositivos que presentan un bajo costo en mantenimiento y de larga vida útil.

D. Sistema de amortiguamiento de masa sintonizada.

A lo largo de este trabajo investigativo y de la recopilación de fuentes bibliográficas se ha determinado que los dispositivos para el control de vibraciones son una excelente opción a considerar para contrarrestar los efectos de fuerzas laterales externas ocasionadas por los fenómenos naturales como los sismos y el viento. En la región de Guatemala el problema mayor que las estructuras afrontan es el movimiento sísmico; esto debido a su ubicación geológica en la tierra la cual se caracteriza por la unión de tres placas tectónicas que interactúan constantemente una con la otra provocando las fuerzas sísmicas. En Guatemala el problema del viento no es tan importante como para tomarlo en cuenta. El viento aumenta su fuerza conforme aumenta la altura provocando golpes que tienden a provocar un efecto de volteo al edificio. Al Guatemala carecer de construcción de edificios altos, el fenómeno del viento no domina el diseño para la resistencia de fuerzas laterales. No obstante, en este trabajo se realizó un análisis del viento para poder ilustrar el comportamiento de la estructura con y sin el dispositivo y poder observar las variaciones de derivas con respecto a esta fuerza también.

La modelación de un edificio y su análisis estructural era un trabajo que años atrás podía tomar una gran cantidad de meses utilizando métodos convencionales de integración y matriciales para poder dar solución a una estructura en cuanto a su control de derivas y revisión de demanda de fuerzas contra la capacidad de la misma. Con el desarrollo de programas computacionales avanzados de diseño, el proceso mencionado anteriormente se ha acortado significativamente en tiempo ayudando al diseñador estructural a agilizar sus procesos de análisis y diseño de una estructura. Mediante el programa Etabs se puede modelar el diseño geométrico, así como las condiciones contextuales de la edificación. En este caso se modeló un edificio que tuviese una sección de viga típica en todos los niveles y ejes así como una sola sección de columna a lo largo de la altura del edificio. La razón de hacer esto fue para la simplificación del análisis estructural y porque los objetivos de este trabajo no consideran realizar la parte

del diseño de secciones por lo que se limita únicamente al control de derivas. Para realizar esto el procedimiento fue elaborar un edificio control el cual no tuviera un control adecuado de derivas y a este mismo edificio se le agregaría el modelo de un dispositivo sismorresistente con el fin de controlar dichas derivas.

Al definir las secciones de vigas y columnas, se considera cumplir primeramente con el requerimiento del código ACI-318-08 que indica que la relación de inercia de la columna con la viga debe ser de por lo menos 1.20. Esta es una forma de protección estructural; mediante este requerimiento se está asegurando que las vigas deben fallar antes que cualquier columna que es lo que se busca al momento de ocurrir un evento extremo. Continuando con la premisa que existe un edificio control el cual debe exceder el límite permisible de derivas se modeló vigas tipo T las cuales añaden cierta rigidez a los marcos estructurales a diferencia de una sección puramente rectangular. Algo importante a tomar en cuenta es que el diseño y control de la edificación se trabaja en el rango post-elástico lo cual implica la suposición que trabajará de manera dúctil y puede llegar a deformarse más allá de su propio límite de fluencia produciendo daños estructurales pero asegurando que la edificación no colapsará. Para poder brindar estas características a la estructura las secciones dimensionadas fueron fracturadas, es decir, se modelaron vigas que pudieran trabajar hasta con 65% de la sección fracturada y a la vez columnas que trabajaran hasta con el 30% de su sección fracturada. Se destaca que este análisis es únicamente para el control lateral y no debe hacerse para el diseño de elementos estructurales ya que para ello los elementos deben ser considerados con el 0% de fracturación, es decir, que deben ser diseñados con su sección completa.

Para brindarle un contexto adecuado al trabajo, se hizo uso de los parámetros brindados por AGIES para la integración de la carga sísmica y de viento. Debido a que las condiciones geológicas son distintas en todas partes del mundo es recomendable utilizar las normas que se han establecido en cada país específicamente ya que estas contextualizan el marco sísmico de la zona y los factores de calibración de los sismos de diseño. AGIES en su norma NSE3 brinda todos los aspectos de calibración del sismo dinámico así como estático para poder obtener el corte basal al cual está sujeto la estructura. La demanda del edificio será mayor y su desplazamiento también aumentará conforme aumente el corte basal.

La obtención de la ecuación de movimiento de la estructura en el último nivel de la torre se obtiene mediante la ecuación de movimiento de un sistema libremente

amortiguado cuya solución es una función periódica decreciente que es dependiente de las propiedades inherentes de la estructura, es decir, su masa, rigidez y amortiguamiento. Los dispositivos de control de vibraciones de masa sintonizada agregan rigidez y masa al objeto de manera significativa por lo que al aumentar la misma se puede determinar una nueva ecuación de movimiento que modele estos incrementos en las propiedades del dispositivo y su efecto en el desplazamiento de la estructura. Un factor importante es observar que la relación de frecuencias entre el dispositivo y la estructura debe ser 1 y esto se debe a que se busca sintonizar los mismos a manera de evitar que la estructura entre en resonancia estructural. Sin lugar a dudas que lo que se quiere evitar es brindarle más daño a la estructura del que podría sufrir sin algún dispositivo. El diseño del dispositivo está basado en el criterio del diseñador estructural y se encuentra más limitado por la falta de espacio o por la demanda excesiva de carga gravitacional que se le pueda inducir a la estructura. En este caso se tomó un 2.25% de la masa total del edificio como masa del dispositivo el cual puede ser variado según el efecto que se pretenda conseguir. En este caso el valor de la masa es alto porque se pretendía controlar las derivas excesivas de la edificación en algunos niveles de la misma. Se puede observar que si se optimiza la estructura lo más posible también el diseño del dispositivo será más óptimo y por lo tanto más económico.

En este paso del trabajo investigativo se puede observar una disminución significativa del desplazamiento en el último nivel de la torre. Este desciende de 0.245 mts a 0.1626 mts lo cual es una diferencia de 0.0823 mts que representa una disminución de hasta el 34% del desplazamiento. Este resultado no debe cegar el panorama general del comportamiento estructural ya que es normal que ocurra una disminución tan significativa en el nivel donde se aplica la fuerza contrarrestante del sismo. Pero al verificar se puede observar que el comportamiento de la estructura tiende a ser más crítico en los puntos inferiores (a partir del nivel 4). Se observa que el porcentaje de reducción de derivas según la tabla es decreciente conforme se acerca a la base. La relación de derivas según la tabla en los primeros tres niveles son menores que en el cuarto y quinto nivel debido a que existe la restricción del empotramiento en la base lo cual le produce menor desplazamiento en estos primeros pisos. Según se experimentó el control de los desplazamientos fue más difícil de controlar en los pisos 4 y 5 porque el efecto de la masa sintonizada decrece desde el nivel superior hasta la

base y así mismo la restricción del empotramiento ya no es significativa en estos mismos pisos.

Se puede observar de manera resumida los efectos del dispositivo en la estructura comparados con el edificio control. Es interesante observar que existe una reducción del 6% en el corte basal de la estructura lo cual indica que la masa sintonizada no es solo capaz de controlar el desplazamiento sino que también es capaz de reducir la demanda sísmica tomando en cuenta que tan solo se coloca el 2.25% de la masa del edificio. Se puede observar que el promedio del porcentaje de reducción de derivas para el sismo es del 24% considerando que los niveles superiores reducen más que los inferiores. Una reducción de este tipo no solo es capaz de controlar desplazamientos de la estructura sino que produce un efecto de mejor serviciabilidad a los clientes cuyo pánico o temor es causado por los grandes desplazamientos que se perciben desde los pisos superiores con respecto al suelo. Se puede observar que el mismo promedio del porcentaje de reducción de derivas para viento es mayor (52%) lo cual deja ver que el desempeño de control lateral en los casos de viento es más efectivo que en los casos sísmicos. Este resultado no es significativo en el caso de este edificio porque su altura no es tan considerable como para verse afectado por los efectos del viento. Pero considerando que la Ingeniería Estructural cada vez alcanza retos más grandes y que la construcción de Guatemala está alcanzando niveles de altura más elevados se puede recomendar un dispositivo de masa sintonizada como un primer controlador de derivas por viento viendo que su desempeño es mejor que con las fuerzas de sismo.

No es posible realizar un análisis económico de la implementación de los dispositivos debido a que se carece del costo de un sistema de amortiguamiento pero, a nivel de servicio se puede observar que el funcionamiento de la masa sintonizada reduce considerablemente los desplazamientos de los pisos superiores del edificio dando como resultado una sensación de seguridad mejor a los clientes del edificio. A nivel estructural se presentan dos situaciones distintas; la primera es que el aumento de masa en la estructura repercute en el diseño de los elementos para soportar la carga gravitacional adherida más la carga de diseño de la estructura. Y en segundo lugar existe una reducción de la demanda sísmica por lo que hay una compensación de esfuerzos en la estructura que repercute en el diseño estructural de los elementos.

VI. CONCLUSIONES

- Se determinaron todos los parámetros correspondientes al movimiento libre amortiguado de la estructura para poder establecer el movimiento actuante sobre el dispositivo de amortiguamiento de líquido sintonizado.
- El sistema de ALS resolvió el problema de derivas cumpliendo con el límite último permisible en el rango post-elástico. Disminuyó las derivas en un 14.7% en promedio.
- Como factores limitantes principales del uso del sistema de ALS se determinó que fueron: la carga distribuida que generan los tanques de agua y el espacio que ocupan.
- El sistema tiende a presentar mejor eficiencia en estructuras de alta frecuencia mientras la frecuencia de los dispositivos tienda al valor de la estructura.
- El sistema podría presentar mejoras en edificios de baja frecuencia siempre y cuando se tenga disponibilidad de espacios amplios para la instalación de los tanques y la frecuencia de los dispositivos tienda a la de la estructura.
- Aunque la carga de viento no es predominante en Guatemala se observó una disminución del 22% de derivas con el sistema de ALS.
- Se logró modelar la interacción entre el dispositivo y la estructura utilizando la ecuación de movimiento y la Ley de Hooke.
- El sistema de amortiguamiento lateral reduce las derivas de acuerdo a la cantidad de dispositivos y disminuye el periodo de la estructura.

- Se obtuvo una reducción de las derivas de hasta un 54% y se logró optimizar el sistema a un 90% de las derivas permisibles reduciendo un 20% las derivas del edificio de control.
- Se determinó que la reducción de las derivas por medio de amortiguadores no solo depende de la rigidez del mismo sino también de la forma del edificio, la distribución del dispositivo en planta y en los niveles.
- La ventaja más alta de los amortiguadores son su relación de disipación de energía por medio de la deformación con la masa que le agregan a la estructura.
- Este tipo de dispositivos se pueden utilizar tanto como disipadores de energía como de aisladores de base.
- Se debe de encontrar un equilibrio entre la rigidez que se le agrega a la estructura y la ductilidad de la misma ya que al reducir el periodo de la estructura el edificio es sometido a aceleraciones más altas según el espectro sísmico.
- Los amortiguadores son dispositivos versátiles que no solo se utilizan para construcciones nuevas sino presentan una gran ventaja en la readecuación de edificaciones antiguas para cumplir con los requerimientos modernos.
- Los dispositivos de aislación de base actúan como un conjunto conformando un sistema amortiguador y disipador de energía.
- Se obtuvo una reducción en el corte basal de 9% y derivas del 17%, lo que indica que el dispositivo diseñado para la reducción de vibraciones optimizó la estructura de control.
- Existe una reducción de la amplitud del periodo de vibración de la estructura de control, la cual se atribuye a la implementación del sistema de aislación de base conformado por 16 dispositivos.

- Se logró de forma efectiva que los dispositivos de aislación de base soportaran la transmisión de carga vertical del peso propio de la estructura.
- Existen normas europeas sobre apoyos estructurales, las cuales se consideran las más actualizadas en los estudios de amortiguadores de base o disipadores de energía. Estas normas se han convertido en un punto de referencia para fabricantes de dichos dispositivos.
- Los aislamientos de base se pueden dividir en dos familias: de tipo histerético conformado por materiales elastómeros y sistemas friccionales. Ambos, se pueden utilizar en conjunto en una misma estructura.
- Existen proyectos que han adoptado los requerimientos y especificaciones de las normas europeas, entre estos se encuentran: "The Taiwan High Rail Project" recientemente completado comprendido de 240km de longitud en el cual se utilizaron 32000 apoyos y "The Chinese High Speed Railway". Esto indica que hay mega estructuras que hoy en día siguen un funcionamiento adecuado con dichos dispositivos.
- Los sistemas alimentados por fuentes externas de energía son también llamados sistemas activos, los cuales requieren de mayor control, calibración y mantenimiento para su debido funcionamiento, elevando de manera significativa los costos de construcción de un edificio de mediana altura.
- El comportamiento estructural óptimo de un dispositivo de masa sintonizada en una edificación es totalmente dependiente del diseño del mismo y la frecuencia natural del edificio. Ya que la relación de frecuencias debe ser igual para evitar que el edificio tenga resonancia estructural.
- El movimiento oscilatorio del dispositivo puede ser controlado dependiendo del tipo de dispositivo de masa. Por ejemplo para un péndulo el período de oscilación es totalmente dependiente de la longitud de una cuerda que sostiene

una partícula, es decir, conociendo la frecuencia de la estructura es posible diseñar la longitud de los cables que sostienen la masa del péndulo.

- Un dispositivo de masa sintonizada es un controlador de vibraciones eficiente para el control de fuerzas sísmicas y de viento, siendo mejor su contribución en esta última. Su desventaja es el sobre costo que puede representar a un edificio, sin embargo, su desempeño estructural y de servicio puede llegar a ser óptimo.
- Se considera que el dispositivo de masa sintonizada tipo péndulo asistido por amortiguadores para el control de su movimiento es el más adecuado para el contexto guatemalteco debido a su diseño más simplificado y su costo más bajo. Esto se infiere porque el dispositivo puede ser un bloque de concreto que cuelga sobre cables tensionados y amortiguadores laterales adosados a la estructura que controlan el desplazamiento del mismo. En cambio existen otros materiales como el plomo y amortiguadores viscoelásticos o elastómeros que su proceso de producción pueden encarecer el costo de los dispositivos.
- Una de las desventajas de los dispositivos de masa tipo péndulo es que pueden ocupar espacios grandes y la limitación de espacio que proporciona la misma configuración estructural del edificio puede ser una limitante para el diseño e instalación del dispositivo.
- El modelo matemático que describe el movimiento de la estructura con su amortiguador se ve afectado por el incremento de rigidez proporcionada por el dispositivo y la disminución de fuerza inercial de la estructura generada la fuerza inercial de la masa sintonizada. Esto se puede observar en la reducción del corte basal de la estructura lo cual induce un decremento de los desplazamientos.
- El modelo computacional indica que un amortiguador modelado como un resorte en el nivel superior del edificio es capaz de reducir el desplazamiento del último piso un 34%.
- Se determina que el dispositivo controla de manera ponderada un 52% la reducción de las derivas de viento y un 21% la reducción de las derivas de sismo

por lo que se concluye que en este edificio el desempeño es más eficiente para controlar fuerzas de viento.

- Se concluye que en el sistema completo del dispositivo de masa sintonizada con el edificio puede existir una compensación de esfuerzos ya que si bien se castiga la carga y la capacidad gravitacional de la estructura se tiene una reducción de corte basal, por lo que hay una disminución de demanda sísmica.
- Se concluye que el dispositivo tiene una influencia mayor, en cuanto a la reducción de derivas, en los pisos superiores y se reduce considerablemente mientras avanza hacia la base de la estructura.
- Se concluye que el dispositivo de masa sintonizada puede ser una alternativa de control de vibraciones en estructuras porque puede cumplir con los límites de serviciabilidad y capacidad de deformación post-elástica de la estructura. Aunque debe situarse dentro del mercado comercial con precios accesibles para ser tomado en cuenta para el diseño de edificios.
- Se concluye que los dispositivos de masa sintonizadas son alternativas estructurales para el control de vibraciones que deben ser estudiadas con mayor profundidad ya que su teoría básica es sencilla y su alcance en Guatemala a nivel constructivo es amplio y técnicamente aplicable.

VII. RECOMENDACIONES

- El diseño de los tanques puede ser de dos formas, varios tanques de dimensiones pequeñas o pocos tanques de grandes dimensiones. Es recomendable trabajar con tanques pequeños por cuestión de mantenimiento ya que si se dañan algunos, aun quedan varios funcionando correctamente, en cambio si se trabaja con un solo tanque grande o pocos tanques grandes, sería más crítico que hubiera fugas de agua por ejemplo. Por otro lado, al escoger tanques con radios muy grandes, la altura de agua debía de sobrepasar la altura del nivel para lograr sintonizar la frecuencia de los tanques con la del edificio.
- Es importante colocar el sistema en la parte superior del edificio, ya sea el último nivel o la terraza, esto para que el sistema trabaje como un péndulo invertido, o visto desde otra perspectiva, para que la fuerza generada por el agua en los tanques tenga un brazo mayor (altura total del edificio) y que por lo tanto genere un momento mayor.
- De ser posible, es recomendable utilizar agua como fluido en los tanques, ya que es posible diseñar un sistema de tuberías para que en caso de incendio se pueda apagar el fuego en cualquier lugar del edificio. Por otro lado, si se utilizaran otros fluidos como el mercurio, puede resultar tóxico en caso de alguna fuga, o para el personal de mantenimiento. Para este caso, también es recomendable proponer una solución para abastecer rápida y eficientemente los tanques en caso de emergencia (incendio provocado por sismo).
- Dentro de la gama de amortiguadores de líquido, también están los Amortiguadores Líquidos de Columna Sintonizados (ALCS), los cuales fueron

descritos en el marco teórico; sería interesante de realizar un proyecto como el presente con el ALCS y observar los resultados.

- Para un análisis más aproximado es recomendable investigar y determinar los efectos que producen las cargas verticales dinámicas producidas por el agua en movimiento de los tanques en el último nivel del edificio.
- Asimismo, sería interesante realizar y observar los resultados de un estudio financiero con análisis de sensibilidad para determinar si el proyecto es viable económicamente. La comparación sería básicamente entre el edificio con marcos de concreto más grandes contra el edificio control con el sistema de ALS incorporado.
- Es clara la viabilidad técnica que existe en la implementación de estos dispositivos en el ámbito guatemalteco. No obstante es importante realizar un análisis de costo beneficio para conocer si es aplicable el sector constructivo nacional. Se recomienda que se analice cada caso por separado ya que puede ser una muy buena opción cuando el parámetro que limita el diseño son las derivas pero puede ser antieconómico si lo que restringe el diseño es la resistencia gravitacional de los elementos.
- Para el diseño de estos dispositivos se recomienda simplificar el sistema para obtener valores con los cuales se puedan trabajar en un software de análisis y diseño estructural. De igual manera se recomienda dedicar tiempo a la optimización en cuanto a la ubicación, cantidad y capacidad de los amortiguadores, con el objetivo de reducir los costos.

- Por último se recomienda tener un conocimiento amplio de la resolución de ecuaciones diferenciales si se desea modelar de manera más precisa la interacción de los dispositivos con la estructura utilizando la ecuación de movimiento.
- Además del chequeo de derivas, es recomendable hacer una revisión costo-beneficio en el momento de optar por un sistema de aislación de base. Este parámetro económico es el que determina si la construcción de una obra es viable.
- Utilizar sistemas tecnológicos computacionales para determinar valores que puedan simplificar el diseño de dispositivos de aislación de base.
- Es importante hacer una revisión exhaustiva de las bases teóricas en cuanto a las ecuaciones de movimiento que describen la interacción de una edificación de mediana altura, con un sistema de aislación de base ya que con la resolución de ecuaciones diferenciales se obtendrían valores que permitan modelar de mejor forma el comportamiento del sistema.
- Existen proveedores de dispositivos aisladores de base, por lo que es importante hacer consultas en cuando al diseño del dispositivo seleccionado para cierta edificación.
- Existen mecanismos que son alimentados por fuentes externas los cuales son gobernados por computadoras que permiten calcular continuamente, es decir,

en tiempo real, las fuerzas que deben aplicarse a la estructura en función de los valores de respuesta estructural medida por los sensores, para contrarrestar las vibraciones y movimientos excesivos.

VIII. BIBLIOGRAFÍA

- A. K. Chopra. (1995). *Dynamics of structures*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- Astronomía. (2006). *Pangea y los movimientos de placas*. Recuperado el 3 de septiembre de 2012, del sitio web: <http://www.astromia.com/tierraluna/placas.htm>
- Avilés Salazar, Raúl. (2001). *Dispositivos para el control de Vibraciones. Dispositivos Pasivos*. Universidad Austral de Chile.
- Bioygeo. (2007). *Estructura de la Tierra*. Recuperado el 3 de septiembre de 2012, del sitio web: <http://www.bioygeo.info/AnimacionesGeo1.htm>
- Bonett, Ricardo L. (2005). *Protección pasiva de estructuras aporticadas de concreto reforzado con el sistema Knee-Bracing*. III Congreso Colombiano de Ingeniería Sísmica.
- Bozzo R., Luis y Ordóñez O., Daniel. (2001) *Disipadores mecánicos de energía*. Revista Bit, marzo 2001. Chile.
- Cedex, Centro de estudios y experimentación de obras públicas. Recuperado el 3 de septiembre de 2012, laboratorio de geotecnia del sitio web: <http://www.cedex.es/lg/tecnicas.html>
- Cmcirubide. *Los terremotos*, Victoria Sugac. Recuperado el 3 de septiembre de 2012 en cmcirubide del sitio web: <http://cmcirubide.blogspot.com/2009/03/los-terremotos-definicion-los.html>

- Dagen Weng, Hui HE Xilin LU. (2009). *Seismic Analysis of the Structure with Viscous Damper Bracings of the Theme Hall of The World*. Expo 2010 Shanghai China.. Consultada el 25 de Junio del 2012. Disponible en: http://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/6535/PAP_WENG_432.pdf?sequence=1
- Douglas P. Taylor. *Fluid Dampers for Application of Seismenergy Dissipation and Seismic Isolation*. Disponible en el sitio web:<http://www.taylordevices.com/Tech-Paper-archives/literature-pdf/42-FluidDampers.pdf>
- Dyke SJ, Spencer BF. (1996). *Seismic response control using multiple MR dampers*. In *2nd international workshop on structural controlll*. Hong Kong University of Scienceand Technology Research Center
- *Dynamic Isolation Systems*. (s.f.). Recuperado el 25 de 06 de 2012, de <http://www.dis-inc.com/products.html>
- Edu4hazards. *Magnitud de la escala de Richter*. Recuperado el 3 de septiembre de 2012 del sitio web: http://www.edu4hazards.org/when_earthquake_es.html
- Fardis, M.N. & Panagiotakos, T.B. (1996), *Hysteretic damping of reinforced concrete elements*. Eleventh World Conference on Earthquake Engineering, Elsevier Science Ltd.paper No. 464. I
- F. Sadek, B. Mohraz, A.W. Taylor, R.M. Chung. (1997), *A method of estimating the parameters of tuned mass dampers for seismic applications*, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 26:617-635, 1997.
- Gómez, Daniel;Marulanda, Johannio;Thomson, Peter. (2008). *Sistemas De Control Para La Protección De Estructuras Civiles Sometidas A Cargas Dinámicas*, Dyna, Vol. 75, Núm. 155, julio, 2008, pp. 77-89 Universidad Nacional de Colombia, Colombia
- Habib Saeed Monir, H. N. (2011). Application of Lead Rubber Isolation Systems in the Offshore Structures. *International multiconference of Engineers and Computer Scientists*, 5.

- Huang W, Gould PL, Martinez R, Johnson GS.(2004). *Non-linear analysis of a collapsed reinforced concrete chimney*.ll Earthquake Engineering Structural Dynamics; 33(4):pp485-98.
- *ICHIJO Technological Homes*. (s.f.). Recuperado el 05 de 05 de 2012, del sitio web:<http://www.ichijousa.com/page/seismicisolation>
- Inaudi, J. A., and De la Llera, J. C. (1992). *Dynamic analysis of nonlinear structures using state-space formulation and partitioned integration schemes*. Rep. No. UCB/EERC-92//8, Earthquake Engineering Research Centre, University of California, Berkeley, California
- Indian Institute of Technology Kanpur. (s.f.). Recuperado el 07 de 04 de 2012, del sitio web: <http://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/2135.pdf>
- JMarcano. (2002). *El planeta tierra*. Recuperado el 3 de septiembre de 2012, del sitio web: <http://jmarcano.topcities.com/index.html>.
- J. Park y D. Reed. (2001) *Analysis of uniformly and linearly distributed mass dampers under harmonic and earthquake excitation*. Engineering Structures, 23:802-814, 2001.
- Juan Andrés Oviedo María del Pilar duque. (2006). *Sistemas de control de respuesta sísmica en edificaciones*, Diciembre 2006 Escuela de Ingeniería de Antioquia, Medellín (Colombia)
- Kelly, J. M. (1988). *National Information Service for Earthquake Engineering*. Recuperado el 11 de 08 de 2012, del sitio web: <http://nisee.berkeley.edu/lessons/kelly.html>
- Lee Chien-Liang, ChenYung-Tsang. (2006). *Optimal design theories and applications of tuned mass dampers* ll. Engineering Structures 28 pp 43–53
- Li, C. (2002). *Optimum multiple tuned mass dampers for structures under the ground acceleration based on DDMF and ADMF*.ll Earthquake Engineering Structural Dynamics,31(4),pp 897–919

- Lomineto, Guiseppe; Bonessio, Noemi y Braga, Franco. 2010. *Seismic Isolation and Protection Systems*. Design Criteria for Added Dampers and Supporting Braces.
- Luis M. Bozzo, Alex H. Barbat. (2000). *Diseño Simoresistente de Edificios. Técnicas Convencionales y Avanzadas*. Editorial Reverté, S.A.
- Lu X L, Zhou Q. (2002). *Dynamic analysis of a combined energy dissipation system and its experimental verification*. Earthquake Engineering and Structural Dynamics. 2002;31:1251-1265
- Marioni, A. (2006). *The european standard en 1337 on structural bearings.*, (pág. 21). Canada.
- Maurer Sohne, *Innovations in Steel*. (s.f.). Recuperado el 15 de 04 de 2012, del sitio web:http://www.maureroehne.de/files/bauwerkschutzsysteme/pdf/de/prospekt/Prospekt_MAURER_Bleikernlager_englisch.pdf
- McCormac, J. C. (s.f.). *Diseño de Estructuras de Acero, Metodo LRFD*. En J. C. McCormac, *Diseño de Estructuras de Acero, Metodo LRFD* (págs. 50-61). Mexico: Alfaomega.
- *Minus K Technology*. (s.f.). Recuperado el 24 de septiembre de 2012, del sitio web:http://www.minusk.com/content/applications_vibration_isolation_systems/heavy-systems.html
- Ordoñez, David. 2009. El terremoto, el epicentro y el hipocentro y susto que pa'qué. Recuperado el 3 de septiembre de 20120, del sitio web: <http://damarchis.com/el-terremoto-el-epicentro-y-el-hipocentro-y-un-susto-que-pa-que/>
- Ricardo Bassottia y Daniel Ambrosini. (2000) *Sobre la utilización de amortiguadores de masa sintonizados en la provincia de Mendoza*.

- Rodríguez Flores, Víctor Manuel y Miramontes de León, Diego. (2001). *Identificación del amortiguamiento histerético efectivo de algunos modelos cíclicos e variables generalizadas*. Universidad Autónoma de Zacatecas. Disponible en el sitio web: <http://www.uaz.edu.mx/cippublicaciones/CD%20Jornadas%202000%20-%202001/Ingenieria/PDF/TI12.pdf>

- Roger Blandon, E. S. (2010). *Guía De Diseño Sísmico De Aisladores Elastoméricos Y Defricción Para La República De Nicaragua*. Nicaragua.

- Rojas, R., & Jara, J. (2004). *Aplicación de Aisladores de Base en la Reducción de Daños sísmicos en México*. *Ciencia Nicolaita* no. 39, 3-15.

- Saito, D. T. (s.f.). *Basic Concept of Base Isolation System for Buildings*. Recuperado el 28 de 08 de 2012, de <http://www.cibw114.net/report/Japan02.pdf>

- Sísmología en Guatemala. INSIVUMEH. 2012. Consultada el 1 de Abril del 2012. Disponible en :<http://www.insivumeh.gob.gt/geofisica/indice%20sismo.htm>

- Tectonicaprimeroa. (2012). *Zonas de subducción y colisión entre placas*. Recuperado el 3 de septiembre de 2012 del sitio web: <http://tectonicaprimeroa.wikispaces.com/0.7+ZONAS+DE+SUBDUCCION+C3%93N-COLISION+C3%93N+ENTRE+PLACAS>

- Terremotos-elmundo. 2010. *Desastres Naturales*. Recuperado el 3 de septiembre 2012, del sitio web: <http://terremotos-elmundo.blogspot.com/2010/10/escala-de-mercalli-modificada-m.html>

- T. Pinkaew, P. Lakkunaprasit, P. Chatupote. (2003.) *Seismic effectiveness of tuned mass dampers for damage reduction of structures*. *Engineering Structures*, 25:39-46.

- Umss. Recuperado el 3 de septiembre 2012, de Vibración libre del sitio web: http://www.umss.edu.bo/epubs/etexts/downloads/19/cap_IV.htm

- Universidad Austral de Chile . (2005). *Análisis de edificios con aisladores sísmicos mediante procedimientos simplificados*. En M. Saavedra. Chile.
- Vizuete, Michael. (2006). *Análisis, diseño e implementación de un Datamart para el área de sismología del departamento de geofísica de la escuela politécnica nacional*. Tesis Escuela politécnica nacional. Guatemala. 168 págs.
- V. Ciampi. (1993). *Development of passive energy dissipation techniques for buildings*. pp. 495–510 in International Post-SMiRT Conference Seminar on Isolation, Energy Dissipation and Control of Vibrations of Structures (Capri, 1993).
- Wakabayashi, M y Martínez Romero, E. (1988), *Diseño de estructuras sismorresistentes*. Mc. Graw Hill/Interamericana 418 p.
- Yazdan, Panah. (2008). *Earthquake Response of Steel Building with Viscous Brace Damper*. University of Putra Malaysia Disponible en: <http://www.uniten.edu.my/newhome/uploaded/coe/iccbt/iccbt%202008/conference%20c%20extract/UNITEN%20ICCBT%202008%20Earthquake%20Response%20of%20Steel%20Building%20with%20Viscous%20Brace.pdf>
- Yen-Po, W. (s.f.). *National Center for Research on Earthquake Engineering*. Recuperado el 17 de 08 de 2012, de http://www.ncree.org.tw/itp2002/09_FundamentalsOfSeismicBaselIsolation.pdf

IX. ANEXOS

Anexo 1: Pre-diseño de elementos del edificio

Paso 1 Definición de materiales para vigas y columnas

	f'c	5,000.00 psi	<i>Columnas</i>
	f'c	3,500.00 psi	<i>Vigas</i>

Paso 2 Pre diseño de las losas a utilizar para toda la estructura

	Área de los paños	4.85 m	<i>Condición</i>
		4.70 m	
	Perímetro	19.10 m	
	t=P/180	<u>0.11</u> m	
	t _{diseño}	<u>0.12</u> m	

Paso 3 Pre diseño de las vigas (Norma 21.3, código ACI)

	b	0.50 m	<i>Luz más grande</i>
	Luz libre	9.70 m	
	h	1.05 m	
	I	<u>0.0482</u> m ⁴	

Paso 4 Pre diseño de columnas

	l _c >6/5l _v	0.0579 m ⁴	<i>Ancho de pre-diseño</i>
	l _c =1/12*b*h ³ ; b _{min} =	<u>0.91</u> m	
	b diseño	<u>0.90</u> m	

Paso 5 Cálculo del módulo de elasticidad

	E _c =	<u>236,352.39</u> kg/cm ²
--	------------------	---

Fuente: Elaboración propia

Anexo 2: Resumen de diseño final de elementos

Vigas

F'c	3500	psi
b	0.45	m
h	0.95	m
Recubrimiento	6	cm

Columnas (cuadradas)

F'c	5000	psi
b	0.95	m
Varillas por lado	6	unidades
No. De varilla	8	
Recubrimiento	6.5	cm

Losas

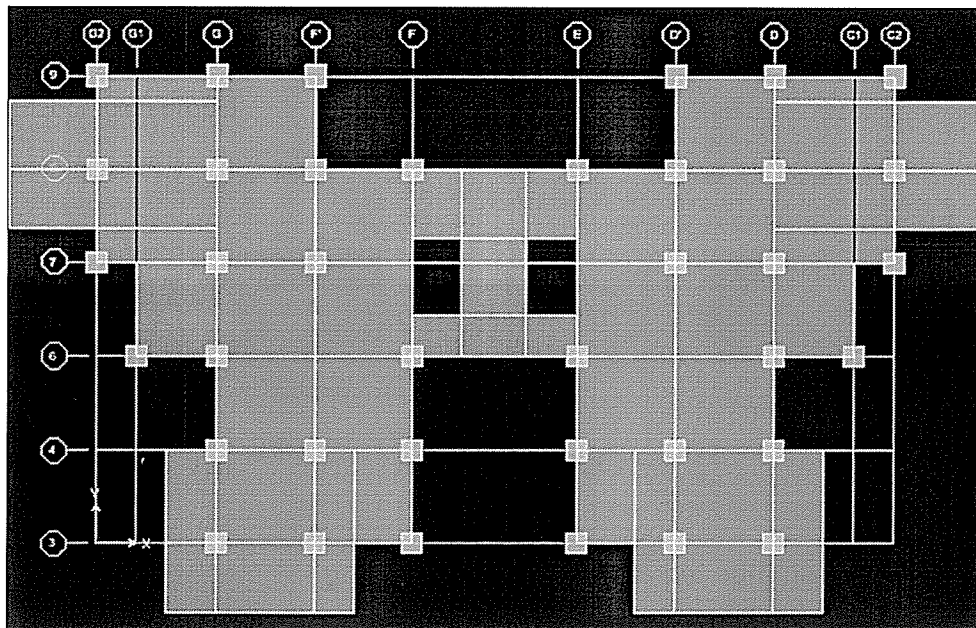
t	12	cm
Tipo	Shell	
F'c	3500	psi

Comentarios adicionales

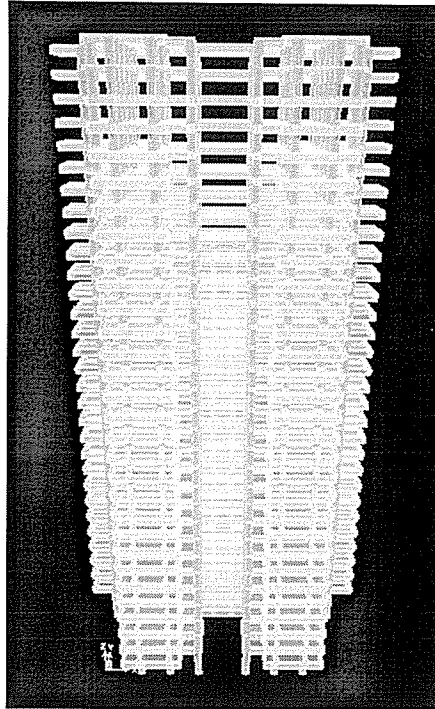
Se agregaron diafragmas rígidos a todos los niveles

Fuente: Elaboración propia

Anexo 3: Planta típica del edificio



Fuente: Elaboración propia

Anexo 4: Vista en elevación

Fuente: Elaboración propia

Anexo 5: Integración de cargas

Paso 1 Ubicación de la obra

Tipo de Suelo	D
Ubicación	Ciudad Capital
Obra	Importante

Paso 2 Definición de los parámetros espectrales

Io	4.00	
Scr	1.65	g
S1r	0.60	g

Paso 3 Ajuste por clase de sitio

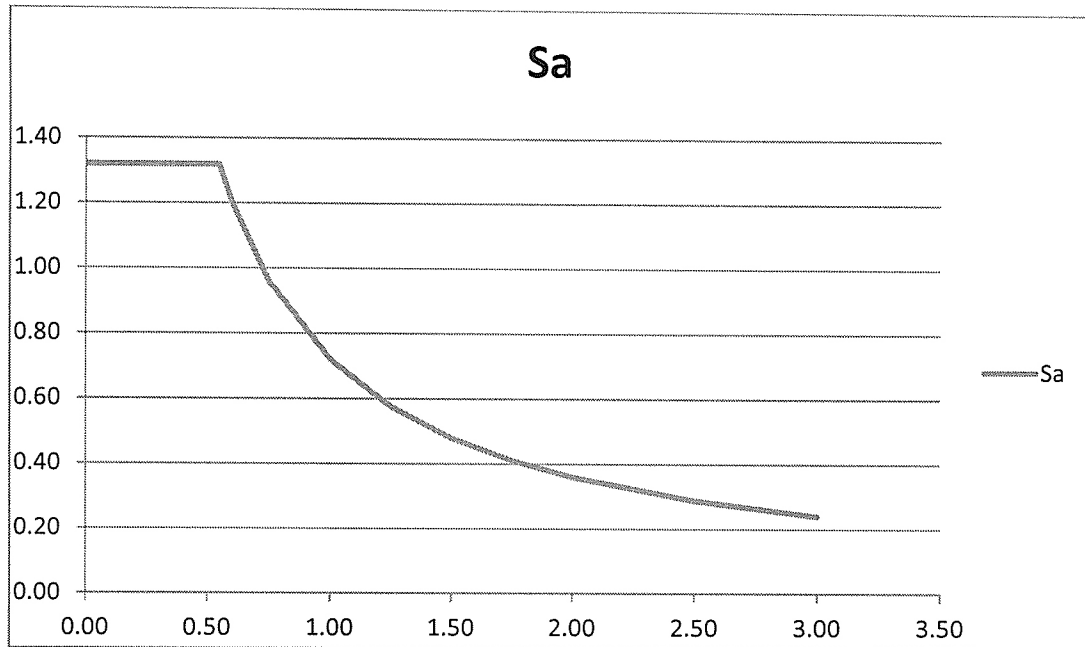
Fa	1.00	
Fv	1.50	
Scs	1.65	g
S1s	0.90	g
$Ts=S1s/Scs$	0.55	s
kd=	0.80	Clas. Importante

Paso 4 Definición de los parámetros espectrales

$Scd=Scs*kd$	1.32	g
$S1d=S1s*kd$	0.72	g

Curva del espectro de respuesta

Seg	Sa
0.00	1.32
0.55	1.32
0.60	1.20
0.75	0.96
1.00	0.72
1.25	0.58
1.50	0.48
1.75	0.41
2.00	0.36
2.50	0.29
3.00	0.24



Paso 5 Parámetros utilizados para esta estructura

R=	8.00
Ω =	3.00
Cd	5.50

Paso 6 Factor de escala del sismo dinámico

Fs	9.81/R
Fs	1.23

De acuerdo con el Código IBC 2009

Fs	9.81*I/R
I	1.25
Fs	1.53

Paso 7 Definición de cargas de servicio

LL	200.00	kg/m ²
DL	250.00	kg/m ²
Ppropio Losa	288.00	kg/m ²

Paso 8 Determinación del periodo por el método A

$$T_a = C_t \cdot h_n^x$$

Ct	0.0466		
x	0.90		
Ta=	2.41	s	
Sa(Ta)	0.30	g	
Cs= Coef. Sism.	<u>0.04</u>		
Masa=W	33,901.07	Ton	
Basal	<u>1,268.50</u>	Ton	

8.2 Revisión de condición de valor mínimo de Cs

Cs min=	0.04
Cs min=	0.06
Cs diseño	<u>0.06</u>

Vs=Cs*W	<u>1,968.97</u>	Ton
---------	-----------------	-----

Paso 9 Calibración del sismo dinámico contra el estático

$$0.85 \cdot \text{sismo estático} = 1,673.63 \text{ Ton}$$

		Factor de escala	Factor calibrado
SPEXAGIES	923.12	1.23	2.23
SPECYAGIES	957.47	1.23	2.15

Fuente: Elaboración propia