

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingeniería

**Modelo estructural a escala utilizando
amortiguadores viscosos como sistemas de
disipación pasiva de energía**

Trabajo de Titulación Pregrado

Carlos Andrés Maruri Ortiz

Ingeniería Civil

Trabajo de titulación presentado como requisito
para la obtención del título de
Ingeniero Civil

Quito, 28 de Julio de 2015

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ
Colegio de Ciencias e Ingeniería

HOJA DE CALIFICACIÓN
DE TRABAJO DE TITULACIÓN

**Modelo estructural a escala utilizando amortiguadores viscosos
como sistemas de disipación pasiva de energía.**

Carlos Andrés Maruri Ortiz

Calificación:

Nombre del profesor, Título académico

Fabricio Yépez, PhD.

Firma del profesor

Quito, 28 de Julio de 2015

Derechos de Autor

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Firma del estudiante:

Nombres y apellidos: Carlos Andrés Maruri Ortiz

Código: 00103434

Cédula de Identidad: 1717822330

Lugar y fecha: Quito, Julio de 2015

RESUMEN

El presente trabajo es un estudio teórico- experimental para la implementación de amortiguadores viscosos en modelos de estructuras a escala. Este estudio será evaluado, analizado y modelado utilizando el programa de elementos finitos SAP2000 el cual permitirá concluir los efectos de los amortiguadores viscosos en la estructura.

El trabajo se divide en cuatro capítulos, en los cuales se presenta lo siguiente:

En el capítulo uno, se revisa los diferentes tipos de disipadores pasivos de energía, y su relación con las estructuras. Adicionalmente se analizan y describen este tipo de dispositivos, se revisan sus bases teóricas y su razonamiento lógico-matemático.

En el capítulo dos, se describe el modelo experimental a escala con los amortiguadores viscosos y sin ellos. Por otra parte, el modelo experimental es diseñado en el programa de elementos finitos SAP2000, de tal manera que se generen resultados semejantes.

En el capítulo tres se presenta los resultados de las aceleraciones registradas tanto en el modelo experimental como en el modelo teórico. Estos datos son comparados y analizados con y sin la incorporación de amortiguadores viscosos. Finalmente se analiza el comportamiento del modelo experimental (datos reales) con el modelo teórico (datos SAP2000).

Finalmente, en el capítulo cuatro se exponen las principales conclusiones y resultados.

Palabras Clave: Modelo estructural 2GL, tipos amortiguadores viscosos, construcción y diseño del modelo en SAP2000.

ABSTRACT

This paper describes a theoretical and experimental study for the implementation of viscous dampers on scaled structural models. This study will be evaluated, analyzed and modeled using the finite element program SAP2000 which allows to obtain the effects of viscous dampers in the structure.

The work is divided into four chapters, in which the following occurs:

In chapter one, the different types of passive energy dampers, and their relationship to structures are reviewed. Additionally, damper devices are analyzed and described, and their theoretical and logical-mathematical reasoning are reviewed.

In chapter two, experimental scaled models with and without viscous dampers are described. Moreover, experimental models are designed using the finite element program SAP2000, so theoretical and experimental results are generated.

In chapter three, the recorded acceleration results in both experimental and theoretical model are presented. These data are compared and analyzed with and without the addition of viscous dampers. Finally, the behavior of the experimental model (actual data) and the theoretical model (SAP2000 data) are analyzed.

Finally, key findings and results are described in chapter four.

Key words: 2DF structural model, viscous dampers types, construction and design SAP2000 model.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	13
ANTECEDENTES.....	14
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
CAPÍTULO 1: METODOLOGÍA.....	16
Bases teóricas del modelo dinámico	16
Principios de amortiguamiento de estructuras	18
Amortiguamiento viscoso equivalente	19
Sistemas de disipación de energía	21
Sistemas de reducción de vibraciones.....	22
Sistemas de control de vibraciones	24
Sistemas viscoelásticos	25
Sistemas viscosos.....	28
Propiedades de amortiguadores viscosos	30
Interacción de la estructura con el uso de amortiguadores viscosos	31
Características de los amortiguadores viscosos	32
CAPÍTULO 2: MODELO EXPERIMENTAL Y TEÓRICO (SAP2000)	34
Explicación del modelo experimental a ser diseñado	34
Descripción de componentes del modelo experimental.....	37
Equipo técnico e instrumentación para lectura de datos	39
Análisis y almacenamiento de datos del modelo estructural con y sin amortiguadores viscosos	41
Modelo teórico utilizando el programa de elementos finitos SAP2000	44
CAPÍTULO 3: RESULTADOS Y ANÁLISIS DEL PROCEDIMIENTO EJECUTADO	57
Modelo estructural a escala	57
Implementación de Amortiguadores Viscosos en la Estructura.....	59
Características del amortiguador viscoso en SAP2000.....	60
Análisis de acelerogramas del modelo teórico SAP2000 y del modelo experimental LoggerLite.....	63
Acelerogramas del modelo experimental con y sin amortiguadores viscosos Nivel 0.	63
Acelerogramas nivel 2 con y sin amortiguadores viscosos.....	65

Acelerogramas nivel 1 con y sin amortiguadores viscosos.....	66
Comparación de los acelerogramas experimentales y teóricos (SAP2000)	67
CAPÍTULO 4: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	69
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	72
ANEXO A: ALMACENAMIENTO DE DATOS EN EL PROGRAMA LOGGERLITE	75
ANEXO B: MODELO DE PÓRTICO Y ACELEROGRAMAS EN EL PROGRAMA DE ELEMENTOS FINITOS SAP2000	77
Diseño del modelo estructural a escala de 2GL en SAP2000, asignando propiedades de sección	77
Ingreso de datos del programa LoggerLite a Excel y SAP(2000).....	81
Ingreso de acelerogramas (Time History) en el programa SAP2000.....	83
ANEXO C: MESA DE EXCITACIÓN DINÁMICA.....	88
ANEXO D: MODELOS ESTRUCTURALES REALIZADOS	90
ANEXO F: AMORTIGUADORES ANALIZADOS PARA ESTE PROYECTO.....	93

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Tabla comparativa de la amplitud y periodo de la aceleración nivel 0 con y sin amortiguador viscoso del modelo experimental.....	64
Tabla 2: Tabla comparativa de la amplitud y periodo de la aceleración nivel 2 con y sin amortiguador viscoso del modelo experimental.....	65
Tabla 3: Tabla comparativa de la amplitud y periodo de la aceleración nivel 1 con y sin amortiguador viscoso del modelo experimental.....	66
Tabla 4: Tabla comparativa de la amplitud y periodo de la aceleración nivel 1 y nivel 2 con y sin amortiguador viscoso del modelo experimental y modelo teórico.....	67

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: (a) Modelo Experimental en estudio (b) Modelo Equivalente	17
Figura 2: Efecto de amortiguamiento decadente	18
Figura 3: Amortiguamiento Viscoso Equivalente	20
Figura 4: Ubicación de los sistemas de disipación de energía. (a) Amortiguadores Viscosos. (b) Aisladores de base. (c) Amortiguadores tipo ADAS.	23
Figura 5: Sistemas de reducción de vibraciones-Sistemas de aislamiento	24
Figura 6: Sistemas de reducción de vibraciones-Sistemas de control de vibraciones ...	24
Figura 7: Amortiguador Visco Elástico.....	26
Figura 8: Relación Fuerza-Desplazamiento para un dispositivo visco Elástico	26
Figura 9: Fase de desplazamiento y velocidad	29
Figura 10: Amortiguador histerético en paralelo con amortiguador viscoso.	31
Figura 11: Ejemplo de un amortiguador Viscoso (VD) y sus partes	33
Figura 11: Jeringas de 60ml utilizadas como sistemas de disipación pasiva de energía.	36
Figura 12: a) Modelo experimental: Componentes y dimensiones de la estructura. b) Modelo real Vista Frontal	38
Figura 13: A) Modelo Experimental detallado en AutoCAD. b) Modelo real de perfil.	39
Figura 14: Acelerómetro: Vernier Low-g Accelerometer	40
Figura 15: Sensor de interface para recolección de información al computador LabQuest Mini	40
Figura 16: Modelo de 2 grados de libertad empotrado en la mesa de excitación dinámica, implementado los acelerómetros en cada nivel de la estructura.....	41
Figura 17: Opciones de grafico para poder analizar los datos.	42

Figura 18: Datos almacenados en el programa LoggerLite proveniente del modelo estructural de 2GL sin amortiguadores.....	42
Figura 19: Modelo de 2 grados de libertad empotrado en la mesa de excitación dinámica, implementado los acelerómetros en cada nivel de la estructura y amortiguadores viscosos tipo jeringa 60ml.	43
Figura 20: Datos almacenados en el programa LoggerLite proveniente del modelo estructural de 2GL con amortiguadores.	44
Figura 21: Cuadro de opciones para analizar el modelo estructural previamente definido en el Anexo B	45
Figura 22: Selección de los casos a ser analizados por el programa SAP2000.....	45
Figura 23: Opción para mostrar graficas provenientes del análisis realizado.	46
Figura 24: Cuadro de opciones para seleccionar las gráficas resultantes del análisis sometido a una función Time History.	46
Figura 25: Selección de la gráfica Time History a la cual se somete el modelo estructural.	47
Figura 26: Selección de la gráfica tipo aceleración en la componente UX del Nodo 23 (losa nivel 2).	47
Figura 27: Graficas de la aceleración 1, de la aceleración en el nivel 1 y nivel 2 del modelo estructural diseñado en SAP2000 sin amortiguadores.	48
Figura 28: Acelerograma base sin amortiguadores ingresado al programa SAP2000 en un rango de tiempo de 10s a 10.2s.	49
Figura 29: Acelerograma del modelo teórico SAP2000 para la losa nivel 2 en un rango de tiempo de 10s a 10.2s.	49

Figura 30: Acelerograma del modelo experimental LoggerLite para la losa nivel 2 en un rango de tiempo de 10s a 10.2s.	49
Figura 31: Comparaciones de los acelerogramas del modelo teórico SAP2000 (azul) y el modelo experimental LoggerLite (rojo) para la losa del nivel 2 en un rango de 10s a 11s.	50
Figura 32: Acelerograma del modelo teórico SAP (2000) para la losa del nivel 1 en un rango de 10s a 10.2s.....	50
Figura 33: Acelerograma del modelo experimental LoggerLite para la losa del nivel 1 en un rango de 10s a 10.2s.	50
Figura 34: Comparaciones de los acelerogramas del modelo teórico SAP 2000 (azul) y el modelo experimental LoggerLite (rojo) para la losa del nivel 1 en un rango de 10s a 11s.	51
Figura 35: Opción Link/Support Properties.....	52
Figura 36: Propiedades del amortiguador 1.....	52
Figura 37: Vista frontal y vista extruida del modelo teórico diseñado en SAP2000 implementado amortiguadores.	53
Figura 38: Graficas de la aceleración 1, de la aceleración en el nivel 1 y nivel 2 del modelo estructural diseñado en SAP2000 con amortiguadores	54
Figura 39: Acelerograma base con amortiguadores ingresado al programa SAP2000 en un rango de tiempo de 10s a 10.2s.	55
Figura 40: Acelerograma del modelo teórico SAP2000 para la losa nivel 1 con amortiguadores en un rango de tiempo de 10s a 10.2s.	55
Figura 41: Acelerograma del modelo experimental LoggerLite para la losa nivel 1 con amortiguadores en un rango de tiempo de 10s a 10.2s.	55

Figura 42: Comparaciones de los acelerogramas del modelo teórico SAP2000 (rojo) y el modelo experimental LoggerLite (azul) para la losa del nivel 1 con amortiguadores en un rango de 10s a 11s.	55
Figura 43: Acelerograma del modelo teórico SAP2000 para la losa nivel 2 con amortiguadores en un rango de tiempo de 10s a 10.2s.	56
Figura 44: Acelerograma del modelo experimental LoggerLite para la losa nivel 2 con amortiguadores en un rango de tiempo de 10s a 10.2s.	56
Figura 45: Comparaciones de los acelerogramas del modelo teórico SAP2000 (rojo) y el modelo experimental LoggerLite (azul) para la losa del nivel 2 con amortiguadores en un rango de 10s a 11s.	56
Figura 46: Comparación de los acelerogramas registrados en el modelo experimental con y sin la implementación de amortiguadores viscosos. En un rango de 0.1s....	63
Figura 47: Comparación de Acelerogramas experimentales Con y Sin Amortiguadores Viscosos para nivel 2 en un rango de tiempo de 10s a 10.5s.	65
Figura 48: Comparación de Acelerogramas experimentales Con y Sin Amortiguadores Viscosos para nivel 1 en un rango de tiempo de 10s a 10.5s.	66

INTRODUCCIÓN

El Ecuador se encuentra ubicado en una de las zonas de mayor peligrosidad sísmica del mundo. Las costas del país se encuentran localizadas en el encuentro de la placa de Nazca y la placa Sudamericana. Este encuentro ha acumulado energía que se ha disipado en eventos trágicos de la naturaleza llamados sismos.

No es posible conocer cuando un sismo puede llegar a ocurrir, ni tampoco de que magnitud puede llegar a ser. Debido a esto, es indispensable ser capaz de diseñar y construir edificaciones resistentes frente a estos acontecimientos, capaces de impedir o disminuir al mínimo de pérdidas económicas y pérdidas humanas.

Por medio de la ingeniería sísmica se pretende estudiar el comportamiento de ciertas edificaciones que utilicen dispositivos que logren alcanzar una mayor ductilidad y una mayor disipación de energía. Existen varios tipos de dispositivos para disipar energía, en este caso se estudiarán los amortiguadores viscosos.

Este tipo de amortiguador viscoso, también llamado hidráulico, es un dispositivo que disipa energía reaccionando con la fuerza resistiva a un desplazamiento determinado. La fuerza de salida del disipador actúa en la dirección opuesta al movimiento de entrada.

En el presente proyecto se pretende explicar y analizar el comportamiento dinámico de una estructura a escala, utilizando amortiguadores viscosos, además de conocer la variación de la aceleración de la estructura con amortiguador y sin amortiguador.

ANTECEDENTES

En el mercado ecuatoriano no se encuentran dispositivos que permitan disipar energía debido a cargas sísmicas. Esto se debe al desconocimiento en implementar estos dispositivos además de la incertidumbre de su comportamiento en estructuras reales. Por ello surge la inquietud de diseñar, explicar, analizar y verificar el funcionamiento a escala de disipadores pasivos de energía, que en este caso son amortiguadores viscosos.

Con el presente trabajo, se pretende demostrar la utilidad y la efectividad que se debe a la implementación de estos dispositivos en las estructuras. A pesar de que el modelo analizado es un modelo real a escala, las propiedades del amortiguador y las propiedades de la estructura estudiada se las puede calibrar de tal forma que se comporten en un modelo real. Por ello surge el interés de estudiantes, ingenieros y profesionales de entender y utilizar amortiguadores viscosos de manera que se puedan utilizar en construcciones del Ecuador.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diseñar un modelo estructural a escala con amortiguadores viscosos que pueda ser acoplado a una mesa de excitación dinámica y además pueda ser sometido a diferentes aceleraciones.
- Evaluar las ondas sinusoidales a diferentes frecuencias y su comportamiento al momento de utilizar amortiguadores viscosos en la estructura.
- Obtener las propiedades de los amortiguadores viscosos, mediante ensayos de aceleración de la estructura y modelos matemáticos.
- Replicar el modelo estructural en el programa SAP2000 al igual que el comportamiento de los amortiguadores viscosos.
- Realizar un análisis comparativo de las capacidades resistentes y las mejoras estructurales debido al uso de amortiguadores viscosos.

CAPÍTULO 1: METODOLOGÍA

Bases teóricas del modelo dinámico

Con el fin de estudiar la respuesta de la estructura ante la imposición de cargas se utiliza un modelo matemático basado en la mecánica newtoniana. Toda estructura responde dinámicamente ante la acción de cargas o deformaciones, generando fuerzas inerciales iguales a su masa por la aceleración (segunda ley de Newton, ecuación dinámica de equilibrio). Para cargas o deformaciones aplicadas de una manera lenta, que es el caso de cargas muertas y vivas no dinámicas, las fuerzas inerciales pueden despreciarse, lo que hace posible un análisis estático de la estructura. Esta simplificación no es válida cuando la estructura se somete a cargas dinámicas o deformaciones rápidas como las causadas por viento, sismo, y vivas, dinámicas o con impacto, casos en los cuales las fuerzas inerciales no son despreciables y se hace necesario un análisis dinámico. (Oviedo, Duque, 2006)

La ecuación diferencial de equilibrio dinámico de una estructura puede ser expresada como:

$$M \ddot{y} + C \dot{y} + K y = P(t) \quad (1.1)$$

En donde:

M : Matriz de masas del sistema.

\ddot{y} : Vector de aceleraciones de cada planta.

C : Matriz de amortiguamiento.

\dot{y} : Vector de velocidades de cada planta.

K : Matriz de rigidez.

y : Vector de desplazamientos de cada planta.

P : Vector de Fuerzas aplicada a cada nivel de la estructura.

Para un sistema estructural en el cual su rigidez está ligada a las columnas del sistema, las masas (losas del sistema) se las considera infinitamente rígidas, para que no actúe ningún tipo de articulación en los nodos, y el amortiguamiento de la estructura se considere viscoso; el sistema en estudio es representado por la Fig. 1:

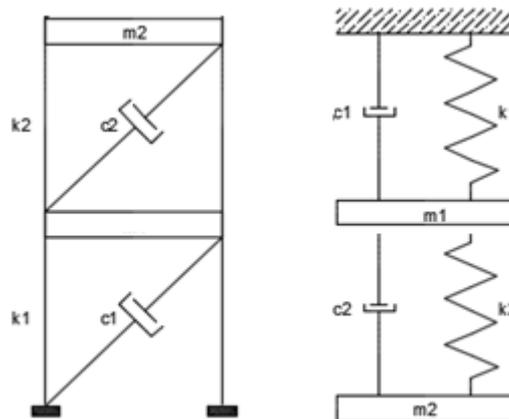


Figura 1: (a) Modelo Experimental en estudio (b) Modelo Equivalente

En base el modelo experimental de la Fig.1 (a), se construye la ecuación diferencial de equilibrio dinámico:

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 \\ -c_2 & c_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{y}_1 \\ \dot{y}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \end{bmatrix} t \quad (2.1)$$

Principios de amortiguamiento de estructuras

Amortiguar se define como detener o reducir una vibración. En la ingeniería estructural puede definirse como el dispositivo a utilizarse para la mitigación de la respuesta dinámica de una edificación. Mientras un sistema regresa a reposo desde una posición desplazada con una cuantiosa rapidez, el amortiguamiento será más alto; esto se puede apreciar en la Fig2. El amortiguamiento viscoso, β , también cambia de periodo de respuesta para un sistema sin amortiguamiento, T , el periodo amortiguado, T_D , se define de la siguiente manera:

$$T_d = \frac{T}{\sqrt{1-\beta^2}} \quad (3.1)$$

Para típicos niveles de amortiguamiento estructural, el cambio en el periodo es despreciable. Para un 5% de cambio en el amortiguamiento, solo se afecta el 0.1%, incluso para un 20% de amortiguamiento, el periodo se incrementa solo por un 2%, esto también se muestra en la Fig2.

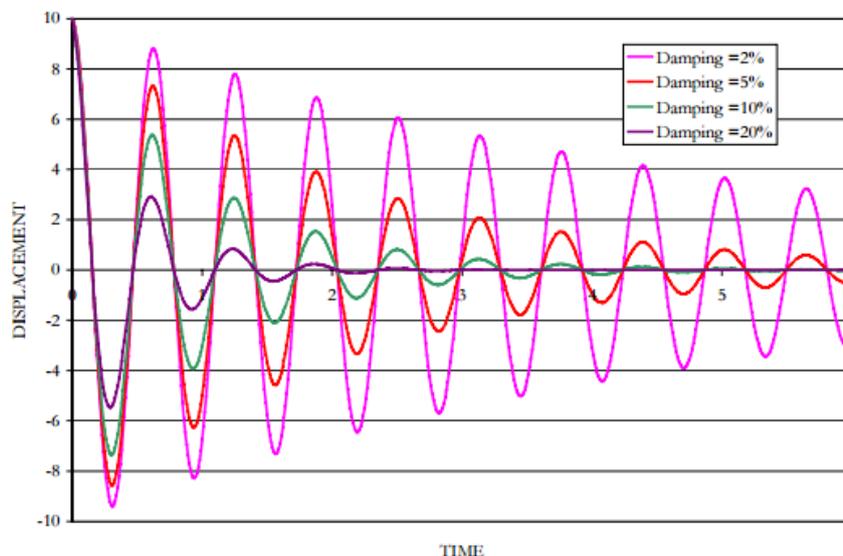


Figura 2: Efecto de amortiguamiento decadente

(In-structure Damping and Energy dissipation – Design Guidelines, Trevor E. Kelly, S.E. –pag.7)

Por otro lado, para sistemas mecánicos, el amortiguamiento es definido como un porcentaje del amortiguamiento crítico, C_c . Un sistema es de amortiguamiento crítico, si cuando se libera, regresa al descanso sin ninguna vibración. El Amortiguamiento crítico depende de la rigidez, K , y de la masa, M , del sistema, definido por la ecuación 4.1:

$$C_c = \sqrt{KM} \quad (4.1)$$

Para movimientos dinámicos, las fuerzas de amortiguamiento son proporcionales a la velocidad de la masa, por ello se denomina amortiguamiento viscoso.

Amortiguamiento viscoso equivalente

A pesar de que es conveniente utilizar amortiguadores viscosos para el análisis dinámico, gran cantidad de energía que se disipa en sistemas estructurales, no es completamente viscosa. El concepto de amortiguamiento viscoso equivalente es utilizado para convertir el amortiguamiento proveniente de recursos como materiales elásticos, en un rango de amortiguamiento viscoso.

El amortiguamiento viscoso equivalente, β , se define como:

$$\beta = \frac{W_D}{4\pi W_S} \quad (5.1)$$

Dónde:

W_D : Energía cíclica disipada

W_S : Energía Potencial

Esta fórmula es aparentemente un método simple para calcular el amortiguamiento viscoso equivalente, el cual muestra el área de ciclo de la histéresis

de un mecanismo. Tanto la energía cíclica disipada como la energía potencial, se muestra en la Fig.3:

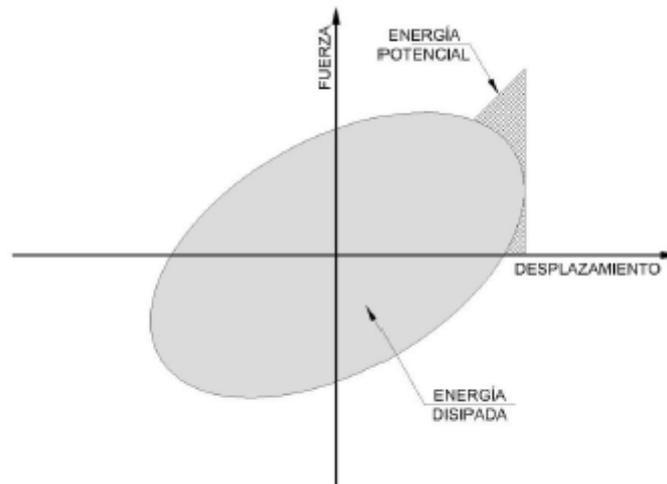


Figura 3: Amortiguamiento Viscoso Equivalente

(In-structure Damping and Energy dissipation – Design Guidelines, Trevor E. Kelly, S.E.
–pag.9)

Cabe recalcar que para un amortiguador distribuido, es mucho más difícil calcular la energía potencial, ya que equivale a la energía potencial a través de la estructura, y la de los mecanismos de la misma, ya que todos pueden tener distintos desplazamientos. Debido a esto, un amortiguador viscoso equivalente puede proporcionar solo una indicación muy aproximada a la efectividad de los mecanismos.

Sistemas de disipación de energía

La disipación de energía en el diseño convencional se concentra en los nudos de unión de vigas y columnas, donde el comportamiento inelástico conduce a daños estructurales. Por ello, a través de los años, se han desarrollado diseños experimentales que reducen la fuerza sísmica, con el objetivo de evitar daños en la estructura.

El objetivo del control de vibraciones posee dos aspectos importantes a considerar:

1. Hacer que los periodos naturales de vibración discrepen de los periodos predominantes de la excitación sísmica, para de esta manera eliminar la resonancia.
2. Alcanzar niveles altos de amortiguación, para de esta manera reducir las deformaciones producidas por el efecto sísmico.

Según las características de los mecanismos a utilizarse para el diseño sismo resistente, además de las características histeréticas, los sistemas de control de vibración se pueden clasificar como sistemas de control pasivos, activos o híbridos. En este trabajo se analizan los sistemas de control pasivos. Este tipo de sistemas son los que no requieren de alguna energía externa para poder lograr su funcionamiento, mientras que los sistemas de control activos requieren ser activados de una energía externa, y finalmente los sistemas de control híbridos son los que son parcialmente activos y pasivos, que si bien requieren energía, no es exorbitante como en el caso del sistema activo.

Sistemas de reducción de vibraciones

Actualmente existen varios tipos de sistemas de protección sísmica, desde simples dispositivos de control pasivo, hasta sistemas complejos que actúan de forma activa. Los sistemas pasivos son los que incluyen sistemas de aislamiento sísmico y sistemas mecánicos de disipación de energía. Cabe recalcar que este tipo de sistemas son los más conocidos, que trabajan en puntos especiales (nudos entre vigas, losas y columnas), de una manera mecánica que disipa energía y además de eso pueden ser reemplazados o reparados.

La disipación pasiva de energía es una tecnología que mejora el desempeño y funcionamiento de una edificación, incrementando el amortiguamiento a la estructura. Estos actúan por medio de los disipadores de energía reduciendo los desplazamientos relativos de entrepiso, los cuales comúnmente determinan las deformaciones de los disipadores.

En cuanto se refiere a su eficiencia, estos sistemas dependen de la cantidad de dispositivos que sean colocados en la edificación, así también de su ubicación, de la clase de disipador y del diseño a utilizarse. Se debe añadir que en varias estructuras, la disipación de energía se ha constituido en una alternativa para los esquemas convencionales de rigidización y reforzamiento, esperando un nivel de desempeño medible y con resultados claros.

Los ejemplos de Sistemas de control de vibraciones pasivos, se muestran en al Fig4.:

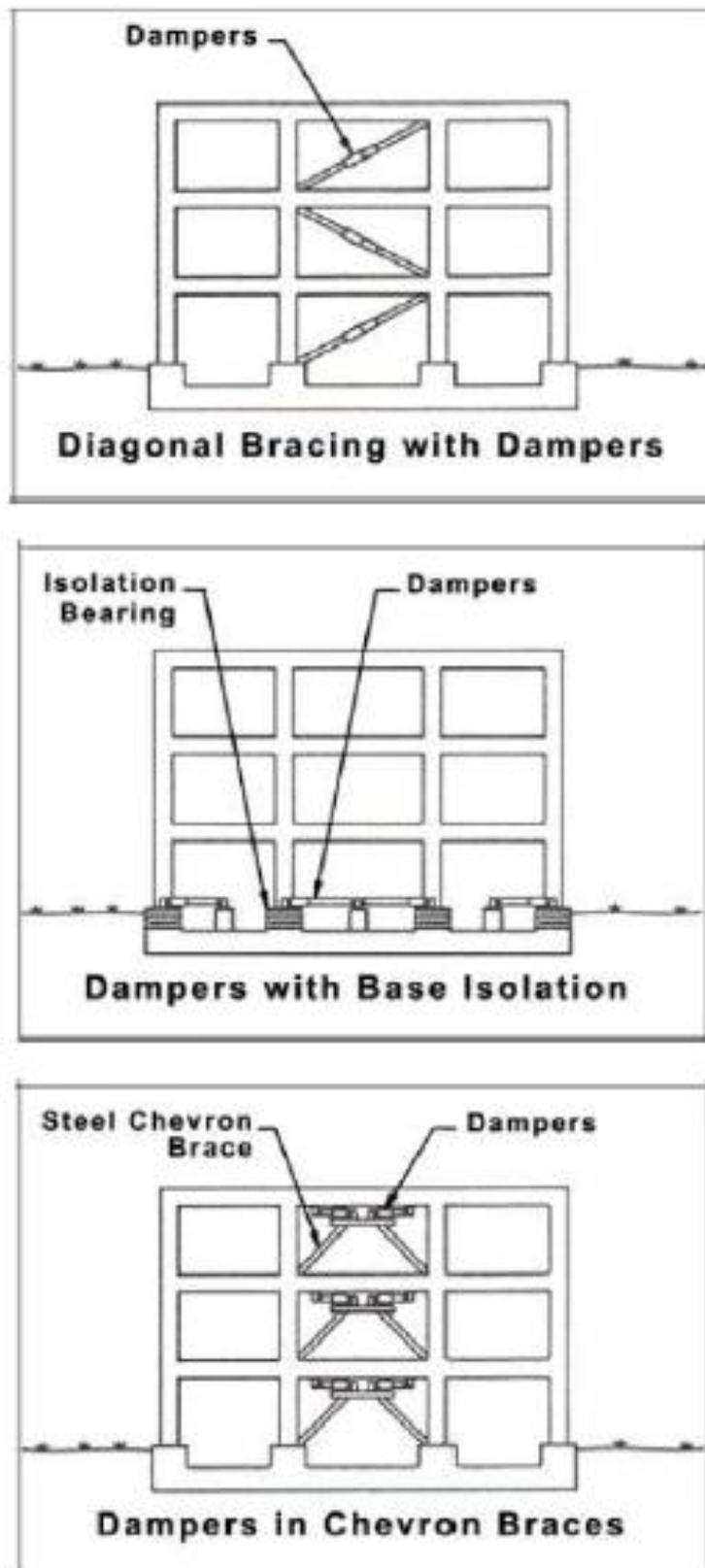


Figura 4: Ubicación de los sistemas de disipación de energía. (a) Amortiguadores Viscosos. (b) Aisladores de base. (c) Amortiguadores tipo ADAS.

Disponible en: <http://www.taylordevices.com/fluidviciousdamping.html>

Sistemas de aislamiento	○ Aislamiento de base	<ul style="list-style-type: none"> • Apoyo de goma laminada con capas de acero • Amortiguador compuesto • Apoyo de goma laminada con núcleo de plomo • Apoyo de goma con alto amortiguamiento • Sistema de fricción puro • Sistema de péndulo friccional • Sistema elástico-friccional
	○ Aislamiento de piso	<ul style="list-style-type: none"> • Bidimensional • Tridimensional

Figura 5: Sistemas de reducción de vibraciones-Sistemas de aislamiento

Sistemas de control de vibraciones	○ Pasivos	<ul style="list-style-type: none"> • Amortiguadores histeréticos 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Amortiguadores de acero ✓ Amortiguadores de plomo ✓ Amortiguadores friccionales ✓ Amortiguadores viscoelásticos
		<ul style="list-style-type: none"> • Amortiguadores viscosos 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Amortiguadores viscosos ✓ Amortiguadores de aceite
		<ul style="list-style-type: none"> • Mecanismos de masa 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Amortiguadores de masa sintonizados ✓ Amortiguadores de líquido sintonizados ✓ Amortiguadores de impacto
	○ Activos	<ul style="list-style-type: none"> • Amortiguadores activos 	

Figura 6: Sistemas de reducción de vibraciones-Sistemas de control de vibraciones

Sistemas de control de vibraciones

Los disipadores de energía son dispositivos diseñados para absorber la mayoría de la energía sísmica, evitando así que ésta sea disipada mediante deformaciones inelásticas en los elementos estructurales. Si bien estos dispositivos pueden ser clasificados como histeréticos y viscoelásticos, se enfocaría el estudio en el comportamiento de estos últimos. Los disipadores viscoelásticos dependen fundamentalmente de la velocidad, y pueden ser divididos en sistemas de sólidos viscoelásticos, fluidos viscoelásticos y disipadores de fluido-viscoso.

Los disipadores viscoelásticos sólidos, están constituidos por una capa de material viscoelástico ubicada entre dos placas de acero, estas placas se suelen conectar en la superficie del contra piso.

Los disipadores de fluido-viscoso son dispositivos que disipan energía forzando el flujo de un fluido a través de un orificio. Una característica fundamental de estos dispositivos, es que su comportamiento y funcionamiento son idénticos al del amortiguador de un vehículo, sin embargo son fabricados para soportar una mayor cantidad de fuerzas, por lo que su construcción y su fabricación son de materiales más duraderos.

La finalidad del uso de este tipo de amortiguadores es que puedan absorber o consumir ciertas cantidades de energías a las cuales es sometida la edificación; de esta manera se minimizan los posibles daños a la edificación.

Sistemas viscoelásticos

Este tipo de amortiguadores viscoelásticos generan una velocidad dependiente de la fuerza del amortiguador, además poseen una rigidez elástica que se adiciona al amortiguador. El amortiguador más común está formado por dos capas de polímero dobladas entre una placa de conducción central y otras dos placas exteriores, este se muestra en la Fig.7. La fuerza en este amortiguador puede ser expresada de la siguiente manera:

$$F_D = k_{eff}\Delta + Cu \quad (6.1)$$

Dónde:

k_{eff} : Rigidez efectiva del amortiguador.

Δ : Desplazamiento

C : Coeficiente de amortiguamiento.

u : Velocidad

De manera diferente al amortiguador viscoso, la amortiguación dependiente de la velocidad es una función lineal a la velocidad, la cual posee un exponente de $\alpha=1.0$ para todos los dispositivos. Cabe recalcar que la ecuación (6.1), brinda una función fuerza-desplazamiento mostrada en la Fig. 8.

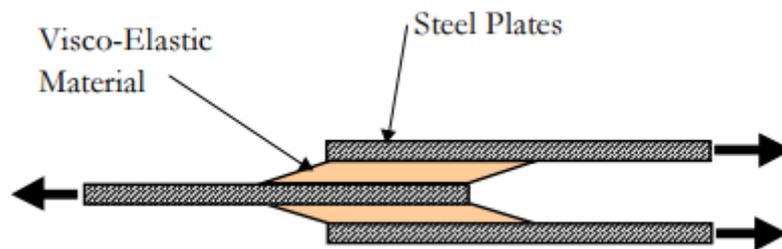


Figura7:AmortiguadorViscoElástico

(In-structure Damping and Energy dissipation – Design Guidelines, Trevor E. Kelly, S.E.
–pag.33)

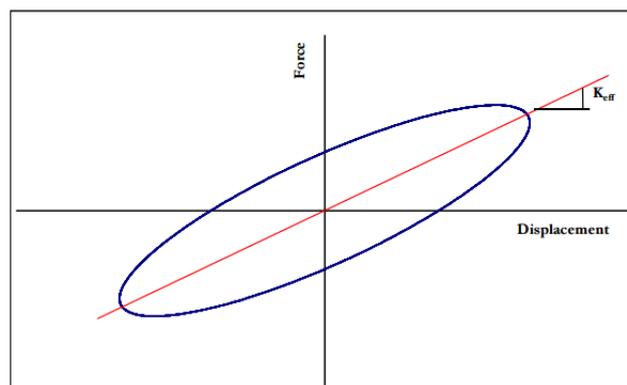


Figura8: Relación Fuerza-Desplazamiento para un dispositivo visco Elástico

(In-structure Damping and Energy dissipation – Design Guidelines, Trevor E. Kelly, S.E.
–pag.33)

La terminología utilizada en la descripción del amortiguador visco-elástico es diferente al utilizado por otros dispositivos. Esto se debe a que la rigidez efectiva es definida en términos de G' , módulo de almacenamiento efectivo, tal como se muestra en la ecuación (7.1):

$$K_{eff} = \frac{G' A_b}{t} \quad (7.1)$$

Dónde:

A_b : En el área de depósito del dispositivo.

t : Grosor total del material visco elástico, este puede ser la suma de todas las capas.

Por otro lado, el coeficiente de amortiguamiento, C , es definido en términos de G'' , módulo de pérdida en corte:

$$C = \frac{G'' A_b}{\omega t} \quad (8.1)$$

Donde ω es la frecuencia. El módulo de pérdida, es generalmente normalizado por la frecuencia, como $\frac{G''}{\omega}$, de tal manera que pueda ser factorado directamente por las dimensiones del amortiguamiento $\frac{A_b}{t}$, así como también para el módulo de almacenamiento.

Las propiedades de amortiguamiento G', G'' , dependen de la frecuencia, la temperatura y de la deformación. La cantidad de dependencia está en función del material que es utilizado para el amortiguador.

Sistemas viscosos

Los amortiguadores viscosos son dispositivos que brindan una fuerza de resistencia que es proporcional a la velocidad aplicada antes que al desplazamiento aplicado. Gran cantidad de amortiguadores viscosos son amortiguadores de fluidos, similares a los aceites utilizados en automóviles. Este tipo de dispositivos tienen poca resistencia a la deformación cuando las cargas son aplicadas lentamente, sin embargo la resistencia incrementa cuando la velocidad en la deformación aplicada incrementa.

Este tipo de amortiguadores son descritos mediante la fórmula (9.1):

$$F_D = C u^\alpha \text{sgn } u \quad (9.1)$$

Dónde:

F_D : Fuerza de amortiguador.

C: Coeficiente de amortiguador.

u : Velocidad aplicada.

α : Exponente de amortiguador.

Sgn : Función que define el signo de la velocidad relativa.

El valor de α generalmente se encuentra en un rango entre 0.3 y 1.0. Varios amortiguadores poseen una válvula de aligeramiento que brinda el límite de velocidad. Para todas las velocidades que superan este límite, la fuerza en el amortiguador es constante.

Los amortiguadores viscosos son atractivos desde una perspectiva teórica ya que la velocidad está fuera de fase con el desplazamiento, como se muestra en la Fig.9.

En esta figura se muestra una onda sinusoidal con periodo de 1 segundo. También se puede notar que cuando la velocidad alcanza su punto máximo el desplazamiento es cero, de igual manera, cuando el desplazamiento alcanza su punto máximo, la velocidad es cero.

En teoría, las fuerzas provenientes de un amortiguador viscoso no se añaden al total de fuerzas elásticas en la estructura, ya que las fuerzas de amortiguamiento máximo ocurren cuando las fuerzas elásticas de la deformación de la edificación son pequeñas. De esta manera se puede concluir que en la práctica, ambas fuerzas se extienden por lo que usualmente la fuerza total incrementa.

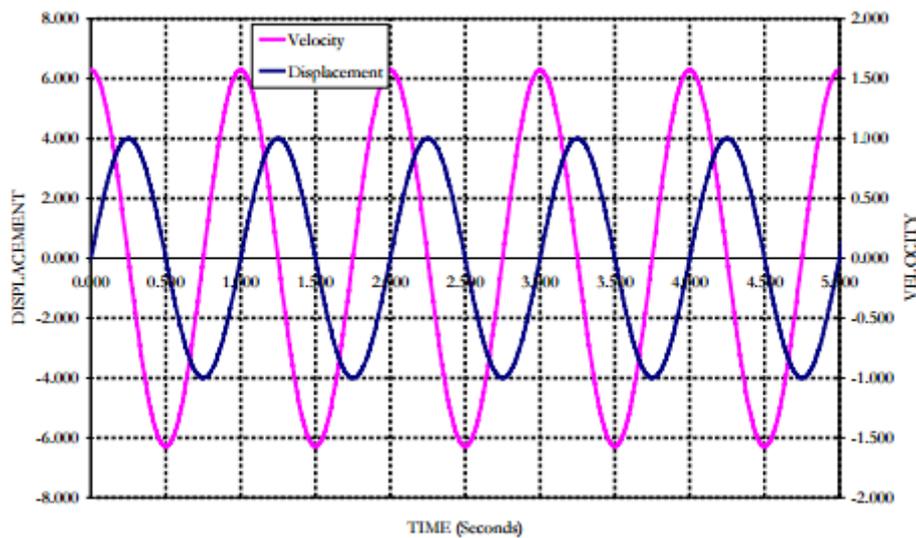


Figura9: Fase de desplazamiento y velocidad

(In-structure Damping and Energy dissipation – Design Guidelines, Trevor E. Kelly, S.E. –pag.26)

Propiedades de amortiguadores viscosos

Como se muestra en la ecuación (9.1), los parámetros en los que se define la fuerza de amortiguador son el coeficiente C , el exponente α y el límite de velocidad. Sin embargo para poder determinar el desplazamiento Δ , y la velocidad, u , se tienen las siguientes ecuaciones:

$$\Delta = \Delta_0 \sin\left(\frac{2\pi}{T} t\right) \quad (10.1)$$

$$u = \frac{d\Delta}{dt} = \Delta_0 \frac{2\pi}{T} \cos\left(\frac{2\pi}{T} t\right) \quad (11.1)$$

Dónde:

Δ : Desplazamiento

Δ_0 : Desplazamiento inicial.

T : Periodo de la onda sinusoidal.

En términos de las propiedades de los amortiguadores disponibles, el coeficiente de amortiguamiento C puede ser casi cualquier valor, y también puede tener cualquier variación con instalar más o menos amortiguadores en la estructura. El exponente α puede variar entre límites de 0.3 y 1.0. En general, mientras mayor sea el valor, se generará una mayor relación lineal entre la fuerza de amortiguamiento y la velocidad. Por ende se recomienda utilizar el valor de 1.0 para evidenciar mejores resultados.

Por otro lado, a pesar de que el límite de velocidad puede servir en los límites de fuerza, esta característica puede incidir en lograr unas características deseables para los amortiguadores viscosos.

Interacción de la estructura con el uso de amortiguadores viscosos

Al utilizar amortiguadores viscosos, la función de amortiguamiento puede ser modificada por la flexibilidad de la conexión entre el amortiguador y la estructura. Por ejemplo, un amortiguador viscoso en una abrazadera puede tener las propiedades de un amortiguador sumado la elasticidad en serie. Parte de la losa puede causar deformación en la elasticidad la cual reduce relativamente el movimiento del amortiguador.

Los amortiguadores también pueden actuar en paralelo con la estructura, si la estructura es elástica entonces el efecto será la inclinación de la elipse. Si la estructura se deforma, entonces una combinación entre la fuerza y el desplazamiento se podrá apreciar, tal y como en la Fig.10.

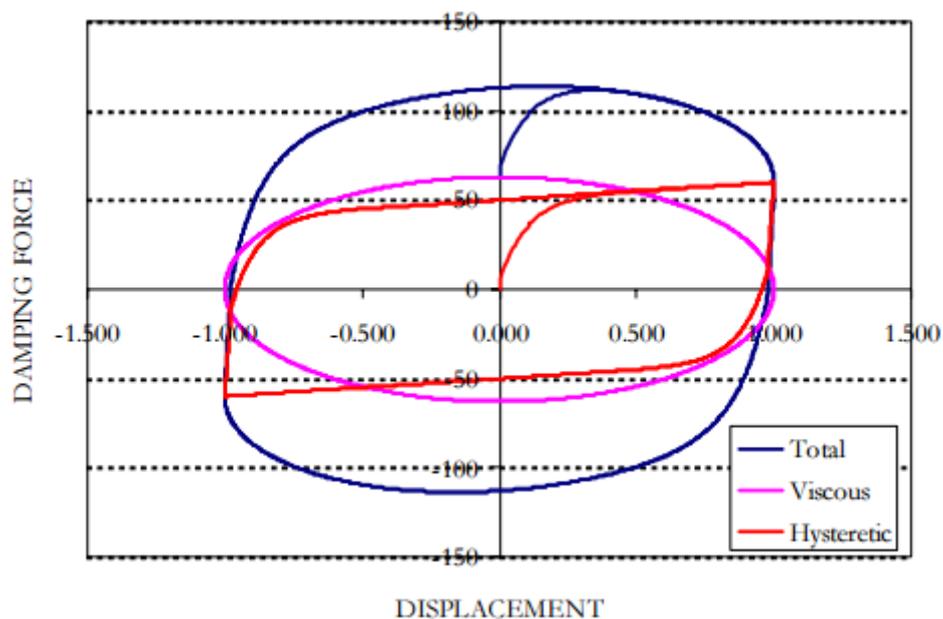


Figura10: Amortiguador histerético en paralelo con amortiguador viscoso.

(In-structure Damping and Energy dissipation – Design Guidelines, Trevor E. Kelly, S.E. –pag.31)

En el ejemplo de la Fig.10 se puede apreciar que la fuerza máxima de la estructura es 60 y el punto máximo del amortiguador es 31.4. La fuerza máxima en el sistema combinado es de 83.2, por lo que su relación será de 23.2, lo que muestra que la fuerza máxima de una estructura incrementa un 74% de la fuerza de amortiguamiento.

Características de los amortiguadores viscosos

Este tipo de dispositivos disipan la energía mediante la presión y amortiguamiento que es sometida el fluido utilizado. Este tipo de dispositivos proporcionan una fuerza resistente que es proporcional a la velocidad aplicada más que al desplazamiento aplicado.

Este tipo de fuerzas que amortiguan son 90 grados fuera de fase con las fuerzas conducidas a la dislocación de la estructura. Esto significa que la fuerza que ejerce el amortiguador no aumenta las cargas sísmicas para un grado comparable de deformación estructural.

Este tipo de dispositivos no requieren de técnicas constructivas distintas a las que se emplean en los edificios convencionales. Su implementación es eficiente en edificios de poca y gran altura.

El fluido de este tipo de amortiguadores poseen las siguientes características:

- Fluido inerte
- Fluido no inflamable
- Fluido no tóxico
- Fluido estable por largos periodos de tiempo.

Se puede evidenciar el funcionamiento del amortiguador cuando el pistón genera un movimiento hacia adelante y hacia atrás, esto quiere decir que el fluido utilizado está siendo comprimido y expuesto a presión.

Para poder diseñar este tipo de dispositivos disipadores de energía, constan de las siguientes piezas mostradas en la Fig. 11:

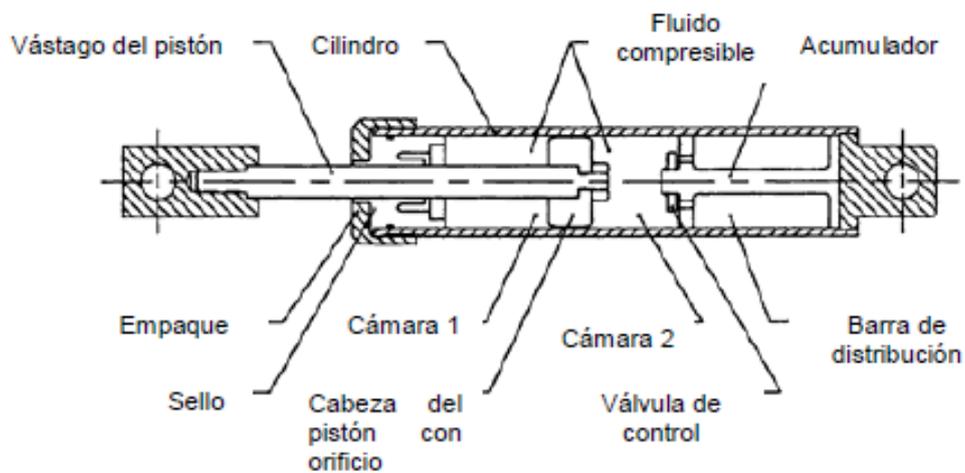


Figura11: Ejemplo de un amortiguador Viscoso (VD) y sus partes

CAPÍTULO 2: MODELO EXPERIMENTAL Y TEÓRICO (SAP2000)

Explicación del modelo experimental a ser diseñado

El concepto moderno de diseño menciona que “para que una estructura este bien diseñada, debe tener un número limitado de miembros que requieren ductilidad y el mecanismo de falla debe estar claramente definido” (Wilson, 2000).

Para poder diseñar y construir el presente modelo estructural a escala, se consideró dos factores predominantes para la elaboración del modelo, la mesa de excitación a utilizarse y el amortiguador que disipa la energía.

En primer lugar, para poder recrear un sismo a escala, se utilizó una mesa de excitación dinámica construida por alumnos de la Universidad San Francisco de Quito. Tanto Molestina (2014) como Stacey (2015), realizaron sus respectivas tesis de grado en base a la elaboración de esta mesa de excitación dinámica (Anexo C).

Esta mesa es potenciada por un motor eléctrico conectado a una reducción de velocidad por varias poleas. Sobre esta reducción se encuentra un rodamiento excéntrico que impulsa el movimiento de la “base móvil”. Este motor es controlado por un temporizador que permite regular la intensidad; en este caso la velocidad a la cual responde el motor eléctrico. Sobre este motor se encuentra una placa “base móvil” de 20cm x 34 cm, la cual es suspendida por medio de placas de acero de 15 cm x 37cm, con un grosor de 1.8 cm (Anexo C).

El modelo estructural a elaborarse se debe ajustar a estas medidas de tal forma que el empotramiento de la base de la estructura no interrumpa con los

desplazamientos de la base móvil, y por ende, no obstaculice la aceleración producida por el motor eléctrico.

El segundo factor a considerar para la elaboración y fabricación del modelo estructural a escala, es el amortiguador utilizado para poder disipar la energía. El amortiguador a utilizarse debe ser un dispositivo el cual no trabaje como una sección rígida; esto quiere decir que al momento de ser implementado en la estructura, y esta a su vez sea sometida a una aceleración en la base, el amortiguador tenga la capacidad para disipar la energía y no transmitirla a otras secciones como las losas o las columnas.

La energía que debía ser disipada proviene aceleraciones con un rango entre $\pm 50 \text{ m/s}^2$ por lo que debía considerarse un amortiguador que trabaje a fuerzas mínimas. Por otra parte, este amortiguador tampoco debe superar las dimensiones de la mesa de excitación dinámica utilizada.

En el mercado ecuatoriano no se encuentran amortiguadores de estas dimensiones que además de ser implementados para resistir fuerzas mínimas, posean un mecanismo viscoso. No obstante, se logró encontrar modelos que funcionan a gas, de 275mm de largo que son utilizados para soportes en los muebles de cocina, sin embargo la fuerza que se necesita para hacerlos funcionar es de 12Kg fuerza (Anexo F). Al ser utilizados en el modelo estructural trabajarían como una sección rígida, mas no como un amortiguador viscoso.

Después de una tediosa búsqueda se optó por utilizar jeringas herméticamente cerradas, las cuales responden como un amortiguador viscoso a base de aire. Las

jeringas utilizadas, están compuestas por un cuerpo transparente, un émbolo blanco y una junta de estanqueidad de color negro.

Estas jeringas poseen una capacidad nominal de 60ml, con un largo total de 27 cm. Al momento de ser selladas herméticamente, funciona como el amortiguador de las características esperadas. Posee una longitud adecuada, funciona en base a aire (fluido ideal) y además reacciona ante fuerzas mínimas.



Figura 11: Jeringas de 60ml utilizadas como sistemas de disipación pasiva de energía.

Una vez establecidos los parámetros de la base (utilizando la mesa de excitación dinámica) y de altura (jeringa de 60ml - amortiguador viscoso), se definió el material para las columnas y losas. Este material debía ser adecuado para generar desplazamientos en los diferentes niveles del modelo estructural, es decir que posea una rigidez apta para las aceleraciones a las cuales el modelo es sometido y sea resistente ante la fatiga. Por otra parte, este material debe tener la característica de poder ser modelado en el programa SAP2000 para evaluar las aceleraciones producidas con y sin amortiguador viscoso.

Debido a ello, se optó por diseñar un modelo estructural que constan con unas columnas de acero laminado y unas losas de madera triplex. Tanto las columnas como las losas se unieron utilizando tornillos de 3/8". Para poder empotrar el modelo estructural a la mesa de excitación dinámica se implementó una base del mismo material de las losas, el cual pueda ser fácilmente acoplado utilizando tornillos de 30mm de largo. Por otra parte, la estructura diseñada para el modelo experimental se representa en la Fig. 12. Se utilizó el programa AutoCAD 2015 para explicar las medidas y exponer los componentes de la estructura.

Descripción de componentes del modelo experimental

- Columna 1 y 2: Láminas de acero laminado de 42cm x 10cm, con un grosor de 2.2mm.
- Losas Nivel 0 -1 -2: Maderas triplex rectangulares de 14cm x 10cm, con un grosor de 1.5cm.
- Base: Madera triplex rectangular de 20cm x 18cm, con un grosor de 1.5cm.
- Para poder unir las columnas con las maderas y a su vez con la base, se utilizaron tornillos de acero para madera de 3/8".

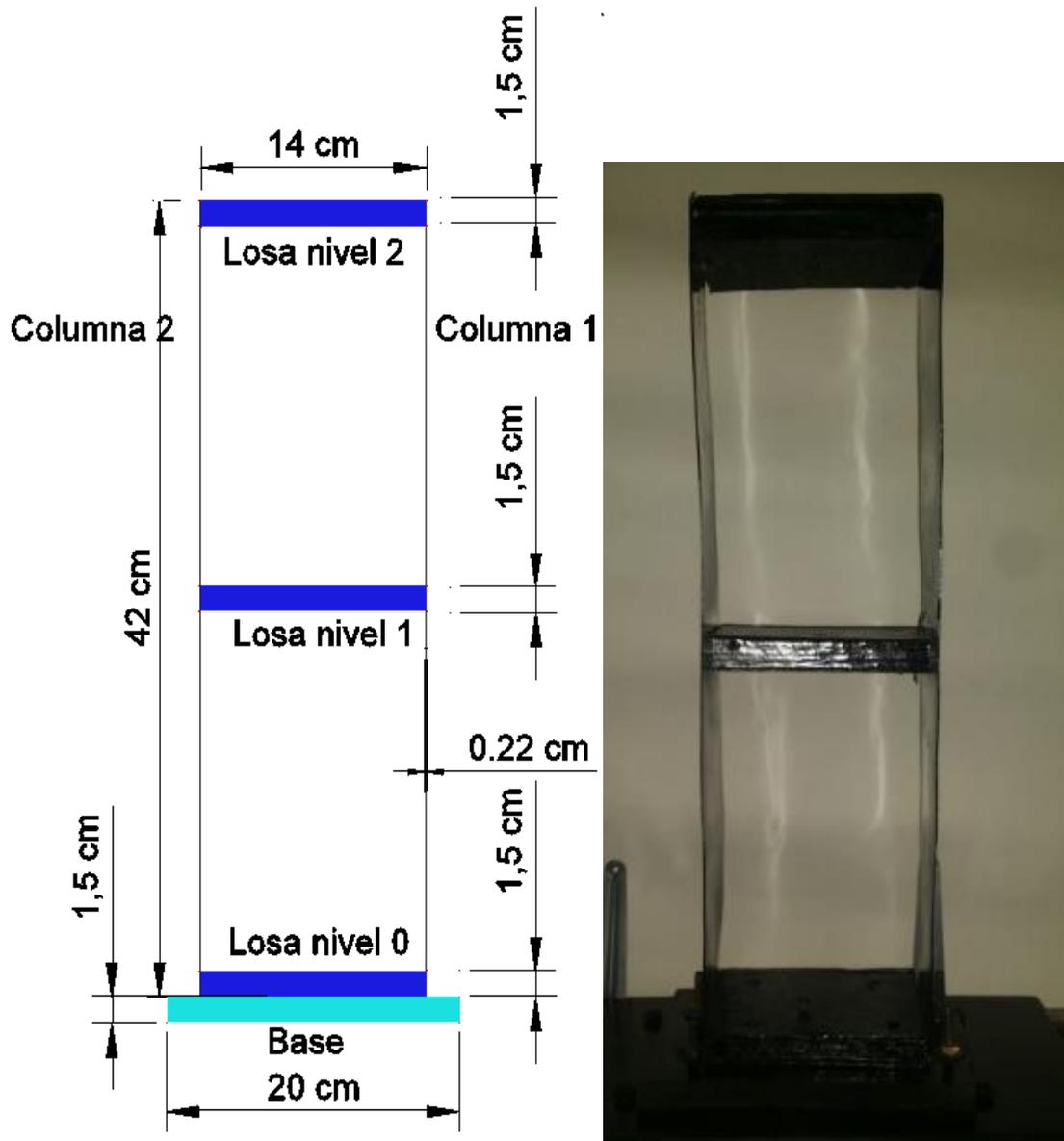


Figura12: a) Modelo experimental: Componentes y dimensiones de la estructura.
b) Modelo real Vista Frontal

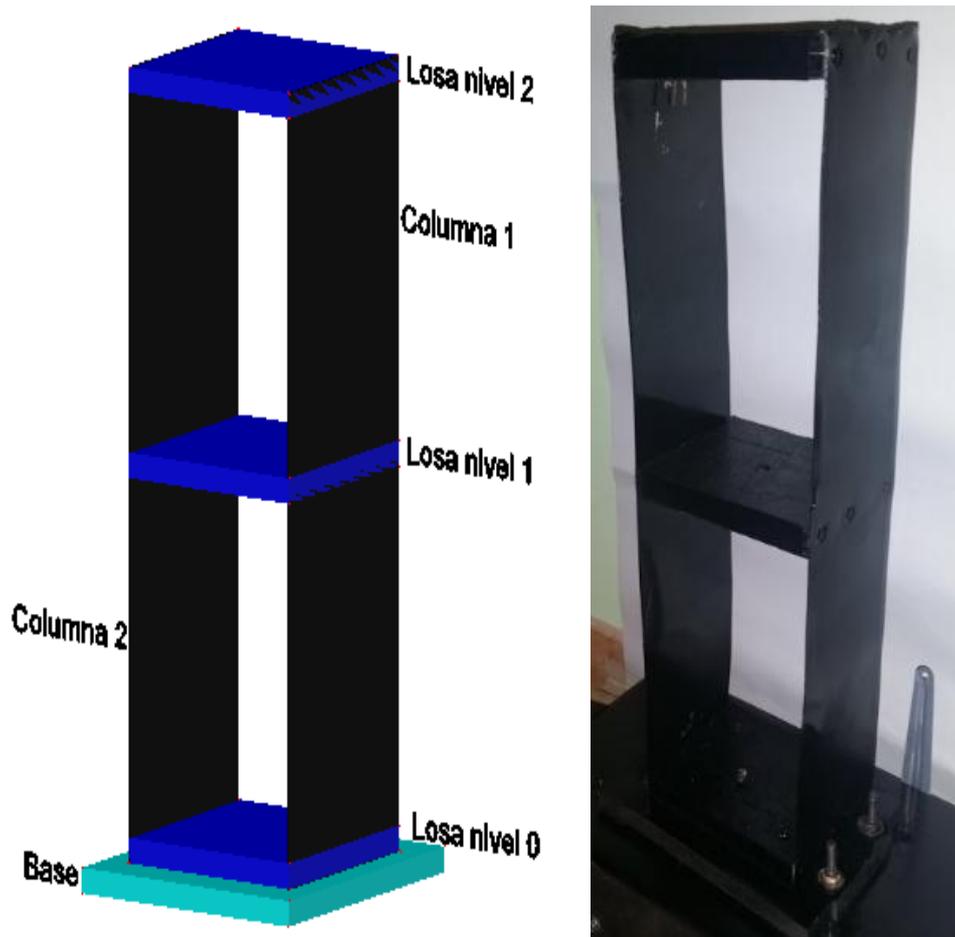


Figura 13:A) Modelo Experimental detallado en AutoCAD. b) Modelo real de perfil.

Equipo técnico e instrumentación para lectura de datos

Una vez que se construyó el modelo estructural y se lo acopló a la mesa de excitación dinámica, se adecuó cada losa para poder adaptar en la mitad de cada una, los acelerómetros Vernier Low-g Accelerometer para medir las aceleraciones.

Este tipo de acelerómetros son sensores mostrados en la Fig. 14 que tienen la capacidad de medir aceleraciones unidireccionales de hasta $\pm 5g$. Según el fabricante, Vernier, pueden ser utilizados simultáneamente midiendo señales de entre dos y tres dispositivos.



Figura14: Acelerómetro: Vernier Low-g Accelerometer

Las especificaciones de estos sensores son las siguientes:

- Poder: 30 mA @ 5 VDC
- Rango: $\pm 50 \text{ m/s}^2$ ($\pm 5 \text{ g}$)
- Exactitud: $\pm 0.5 \text{ m/s}^2$ ($\pm 0.05 \text{ g}$)
- Frecuencia de Respuesta: 0–100 Hz
- Resolución: 0.037 m/s^2 (LabQuest 2, LabQuest, LabQuest Mini, Go!Link, LabPro)

Adicionalmente se requiere disponer de una interface capaz de leer la señal captada por los acelerómetros y traducirla a un lenguaje que pueda ser analizada por el usuario; esta interface se denomina LabQuest Mini Fig. 15. Esta interface capta tres señales distintas de acelerómetros, uno por cada losa, y es transmitida al computador.



Figura15: Sensor de interface para recolección de información al computador LabQuest Mini

Es importante mencionar que se requiere un software gratuito para leer la información recolectada. Este programa se denomina LoggerLite y puede ser descargado gratuitamente en <http://www.vernier.com/products/software/logger-lite/#download>.

Análisis y almacenamiento de datos del modelo estructural con y sin amortiguadores viscosos

Una vez instalado el programa LoggerLite en el computador, y adaptado los acelerómetros en cada losa, tal como se muestra en la Fig. 16; se enciende el motor eléctrico de la mesa de excitación dinámica y se almacena la información de cada nivel del modelo estructural. El desarrollo del almacenamiento de la información se la detalla en el **anexo A**. Adicionalmente, este experimento se lo almacena en video para ser posteriormente comparado con el modelo experimental implementado los amortiguadores viscosos.



Figura 16: Modelo de 2 grados de libertad empotrado en la mesa de excitación dinámica, implementado los acelerómetros en cada nivel de la estructura.

A los datos recolectados en el programa LoggerLite se altera el rango de tiempo utilizando la opción GraphOption mostrada en la Fig. 17 y se analizan los datos en el rango de 1s a 1.3s mostrada en la Fig 18. Esto permitirá visualizar los acelerogramas de una manera más clara.

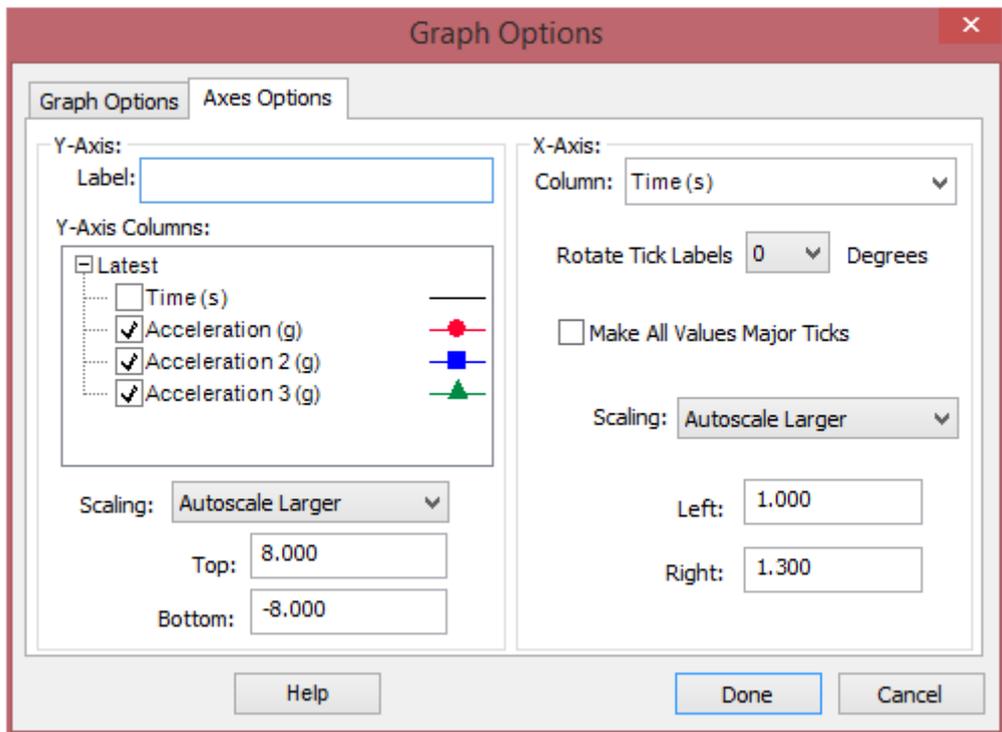


Figura 17: Opciones de grafico para poder analizar los datos.

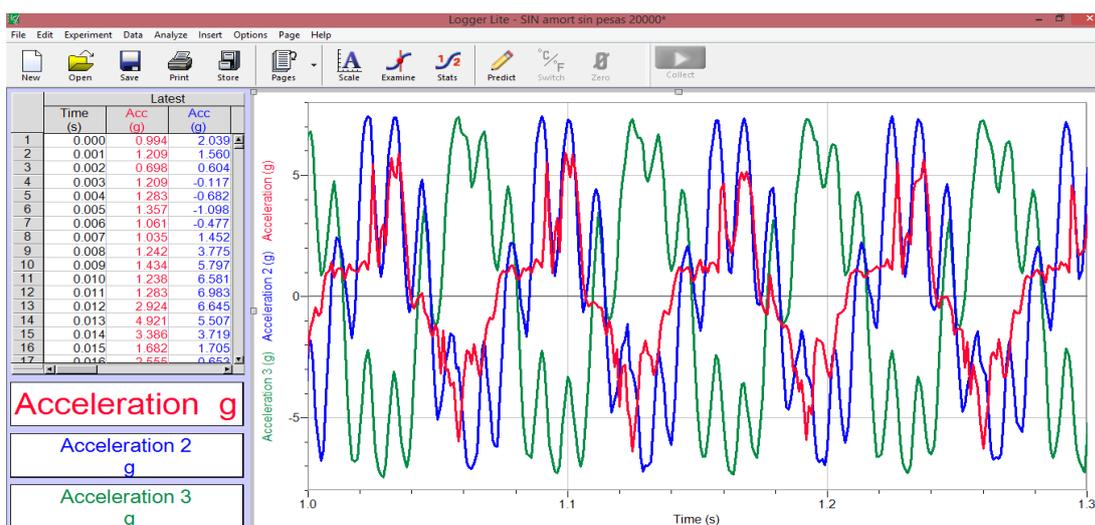


Figura18: Datos almacenados en el programa LoggerLite proveniente del modelo estructural de 2GL sin amortiguadores.

Almacenada la información proveniente del modelo estructural de 2GL sin amortiguadores, se procede a realizar el mismo procedimiento del Anexo A, para almacenar los distintos datos del modelo estructural implementando amortiguadores viscosos. En esta ocasión se implementan los amortiguadores viscosos (jeringas de 60ml) en el modelo estructural y se almacena la información encendiendo el motor eléctrico. El modelo estructural se lo muestra en la Fig 19, los datos recolectados en el rango de tiempo 1s-1.3s se muestra en la Fig. 20.



Figura19: Modelo de 2 grados de libertad empotrado en la mesa de excitación dinámica, implementado los acelerómetros en cada nivel de la estructura y amortiguadores viscosos tipo jeringa 60ml.

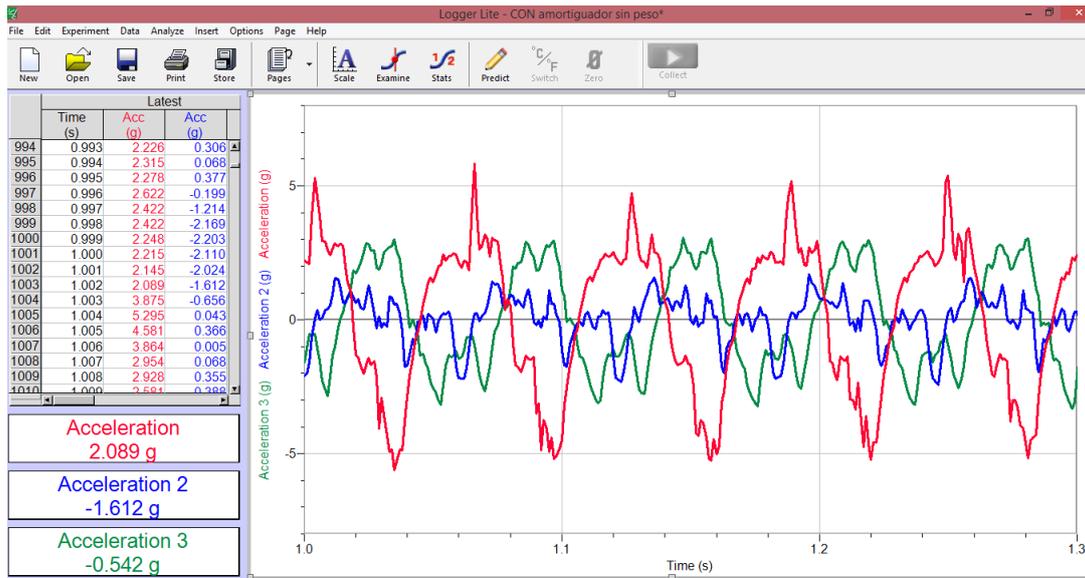


Figura20: Datos almacenados en el programa LoggerLite proveniente del modelo estructural de 2GL con amortiguadores.

Modelo teórico utilizando el programa de elementos finitos

SAP2000

Se procede a utilizar el ingreso de datos del pórtico y de los acelerogramas según el **Anexo B**. Además de definir una función tipo Time History para el acelerograma proveniente del registro de datos del modelo sin amortiguadores, también se define una función tipo Time History para una acelerograma proveniente del registro de datos del modelo con amortiguadores.

Para poder analizar los resultados del modelo estructural sin amortiguadores, se selecciona Analyze- Set AnalysisOptions en donde se despliega la Fig. 21 en la cual se puede asignar un análisis de pórtico en 2 direcciones tipo XZ PlaneFrame.

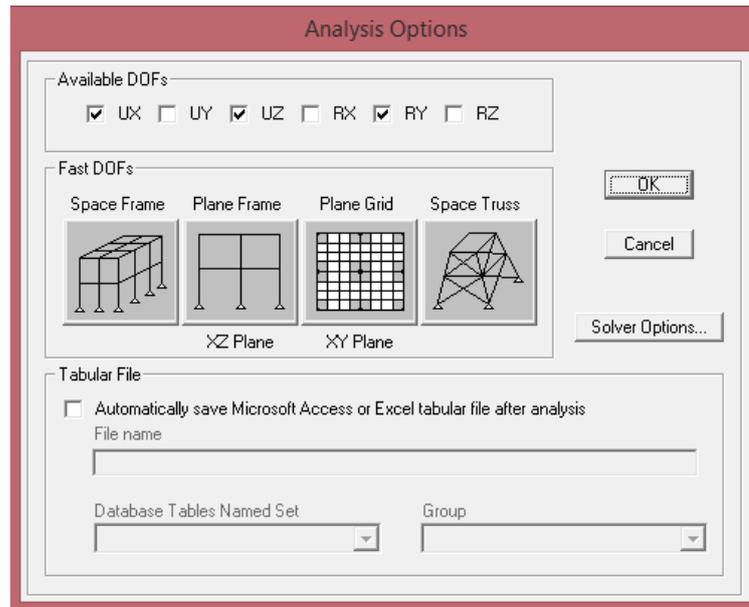


Figura21: Cuadro de opciones para analizar el modelo estructural previamente definido en el Anexo B

Una vez asignado el tipo de análisis, se corre el análisis seleccionando los casos de carga muerta (Dead), Modal y Time History. Tal como se muestra en la Fig. 22:

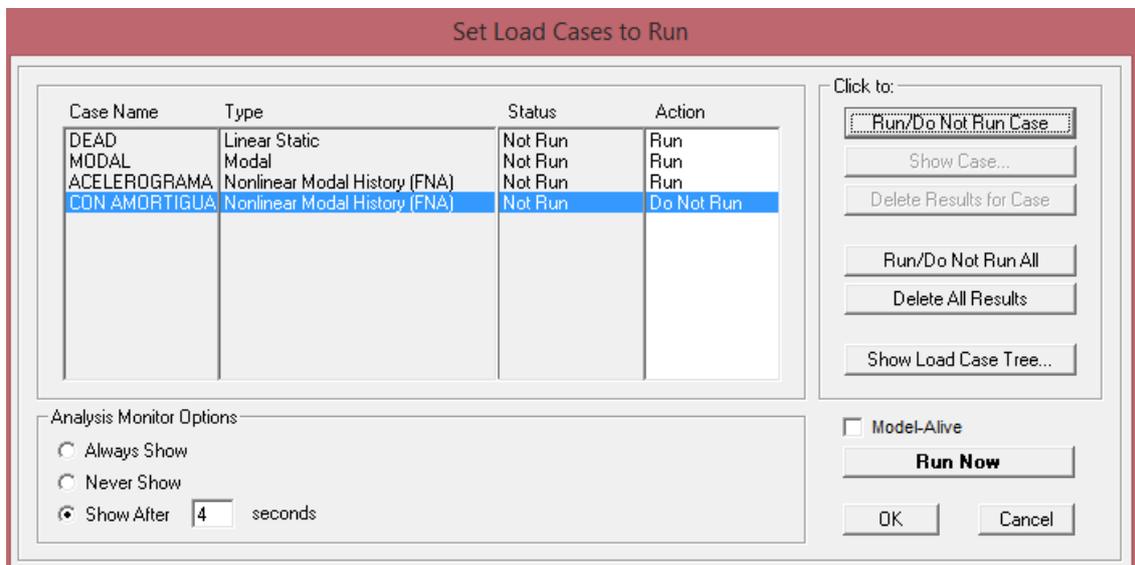


Figura22: Selección de los casos a ser analizados por el programa SAP2000.

Una vez finalizado el análisis, se selecciona Display – Show PlotFunctions Fig. 23 y desplegara una pantalla en la cual se pueden definir qué tipo de gráficos se desea, en que rango de tiempo y en base a que acelerograma, Fig.24.

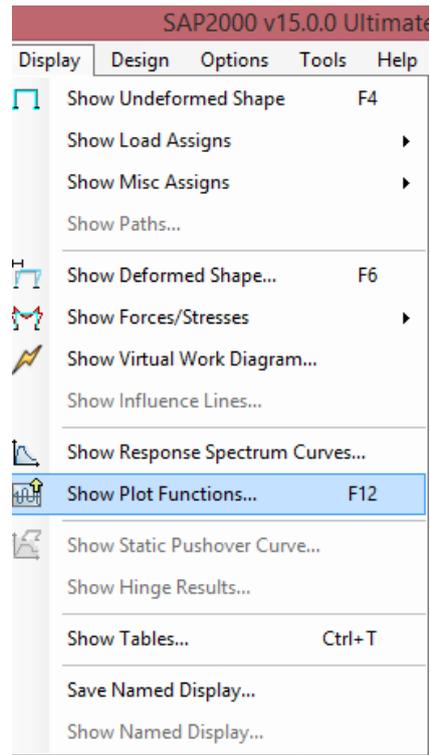


Figura23: Opción para mostrar graficas provenientes del análisis realizado.

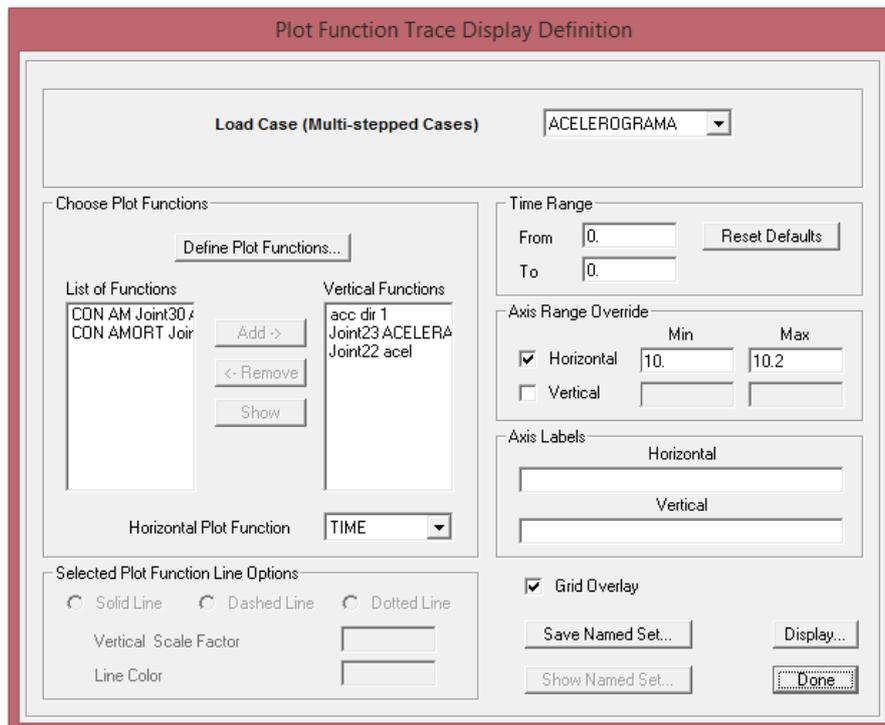


Figura24: Cuadro de opciones para seleccionar las gráficas resultantes del análisis sometido a una función Time History.

En este cuadro se halla la opción Define-PlotFunctions, en la cual se puede seleccionar el acelerograma al cual es sometido el modelo estructural Fig. 25. Además, también se pueden definir otro tipo de gráficas tal como: fuerzas, desplazamientos,

aceleraciones, etc. resultantes del Time History ingresado Fig. 26. En este caso se seleccionan las aceleraciones relativas en la componente UX en los nodos que unen la Losa nivel 2 y Losa Nivel 1 con la columna 1.

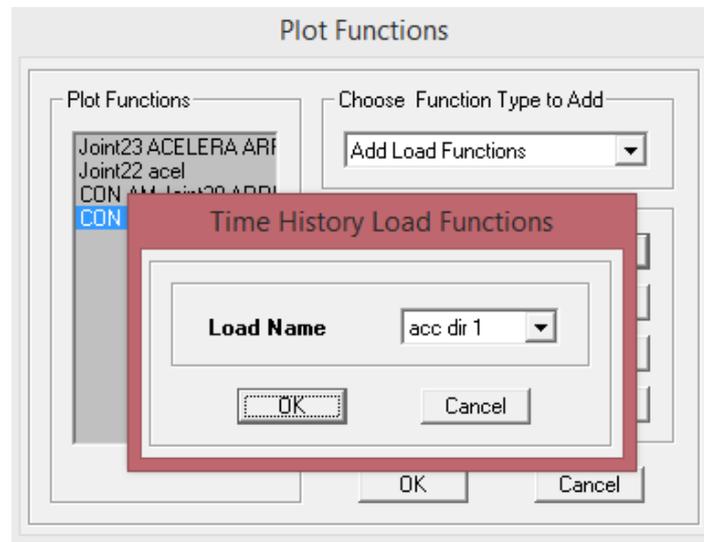


Figura25: Selección de la gráfica Time History a la cual se somete el modelo estructural.

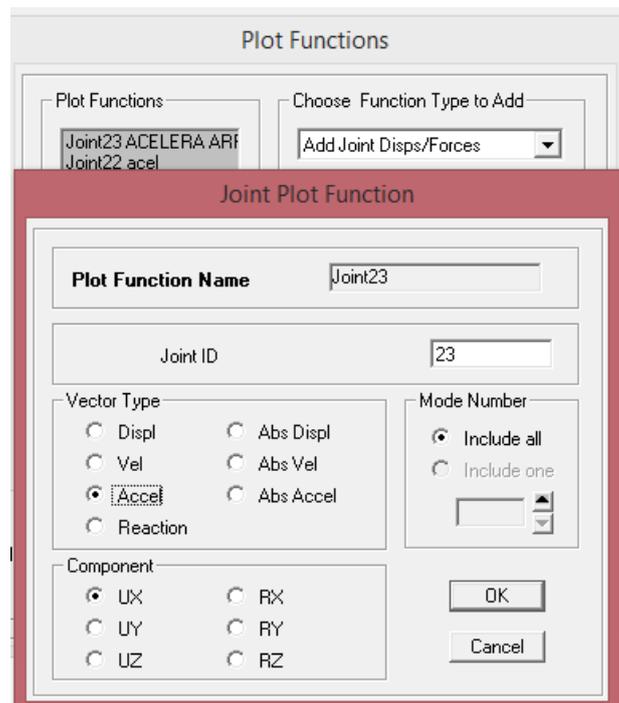


Figura26: Selección de la gráfica tipo aceleración en la componente UX del Nodo 23 (losa nivel 2).

Una vez establecido un rango de tiempo en el cual se desea visualizar la gráfica, se selecciona Display y se observan las curvas de aceleración relativa producidas por el acelerograma sin amortiguadores Fig. 27.

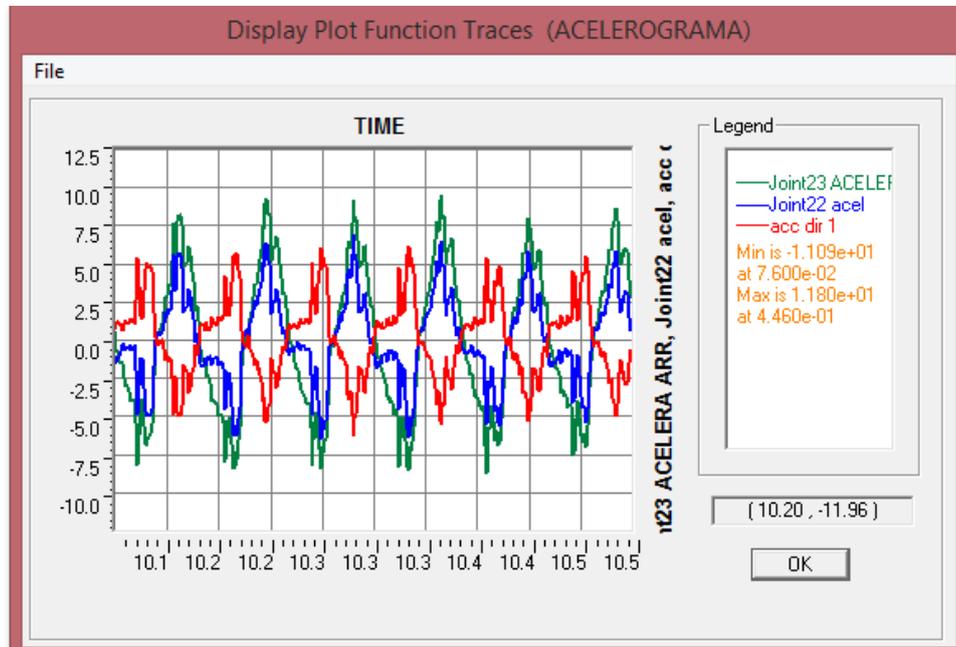


Figura27: Graficas de la aceleración 1, de la aceleración en el nivel 1 y nivel 2 del modelo estructural diseñado en SAP2000 sin amortiguadores.

Para poder comparar las gráficas del modelo teórico diseñado en el programa SAP2000, con las gráficas del modelo experimental, se exportan las tablas de los datos seleccionando File- PrintTables to File, al seleccionar esta opción, se almacenará un archivo tipo texto con todos los datos cada 0.001s del acelerograma 1, y de los acelerogramas del nivel 1 y 2. Para poder utilizar estos datos, se siguen los pasos mencionados en el Anexo B para poder exportarlos en un libro de Excel. Al poder disponer de los datos reales y experimentales en un libro Excel, se puede graficar ambas aceleraciones de los distintos niveles y compararlas entre sí.

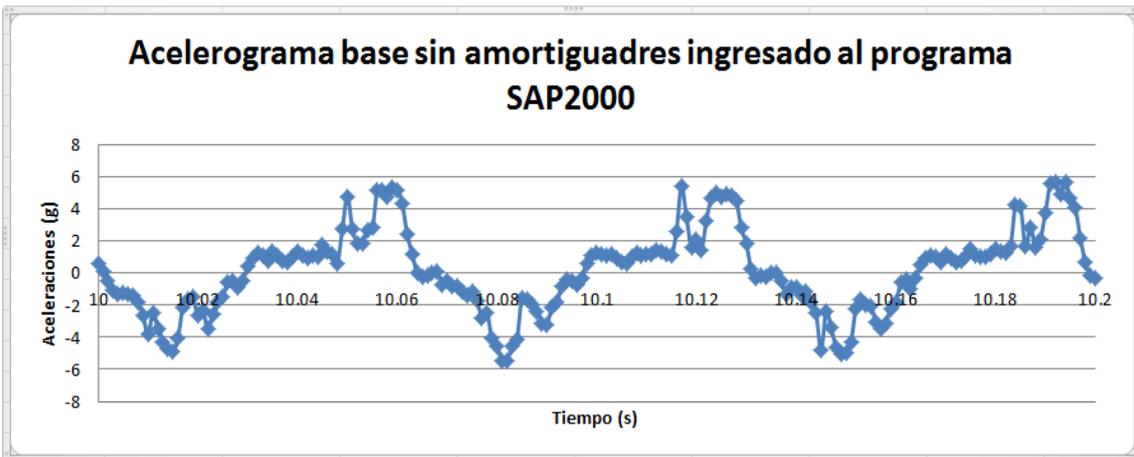


Figura28: Acelerograma base sin amortiguadores ingresado al programa SAP2000 en un rango de tiempo de 10s a 10.2s.

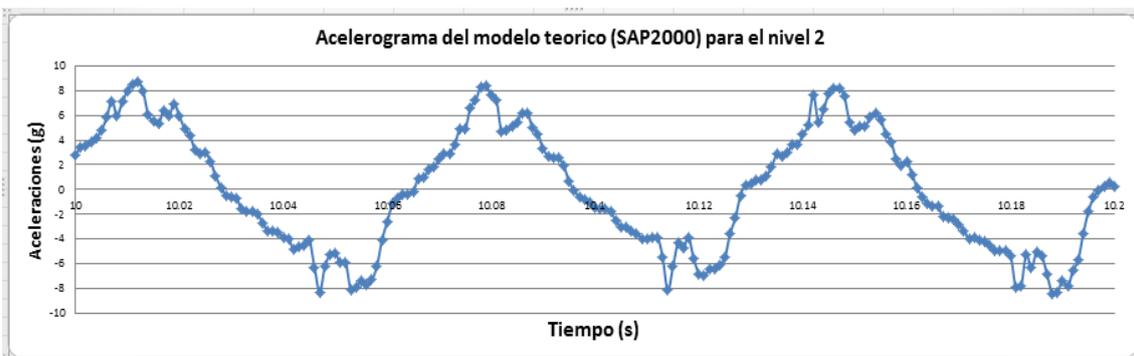


Figura29: Acelerograma del modelo teórico SAP2000 para la losa nivel 2 en un rango de tiempo de 10s a 10.2s.

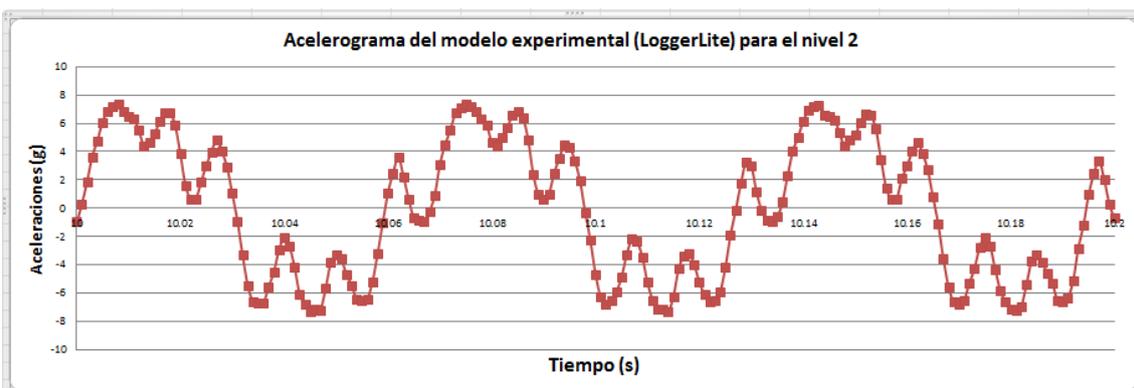


Figura30: Acelerograma del modelo experimental LoggerLite para la losa nivel 2 en un rango de tiempo de 10s a 10.2s.

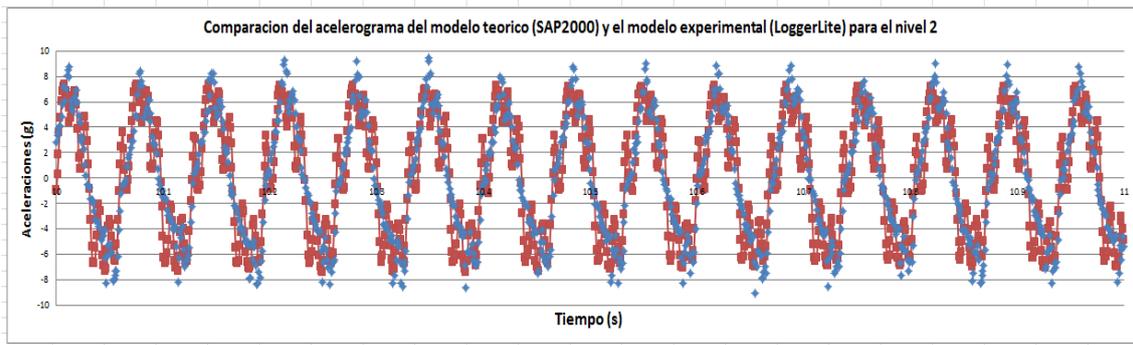


Figura31: Comparaciones de los acelerogramas del modelo teórico SAP2000 (azul) y el modelo experimental LoggerLite (rojo) para la losa del nivel 2 en un rango de 10s a 11s.

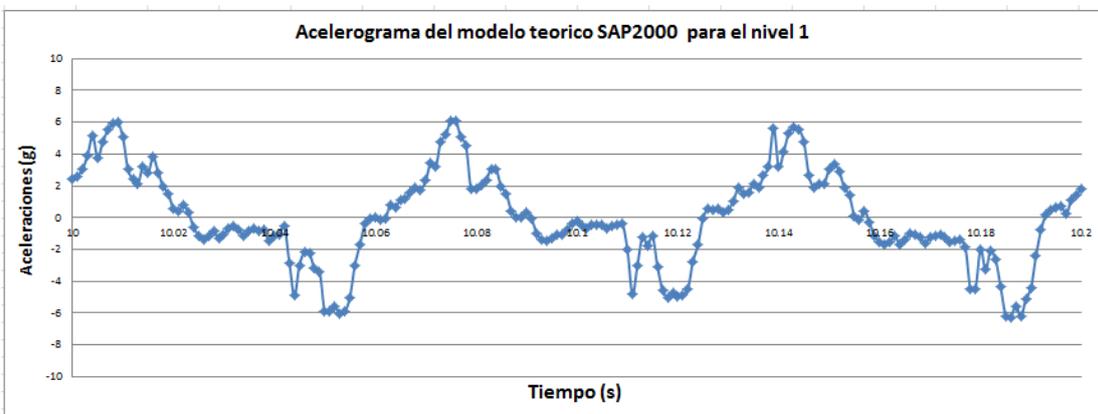


Figura32: Acelerograma del modelo teórico SAP (2000) para la losa del nivel 1 en un rango de 10s a 10.2s.

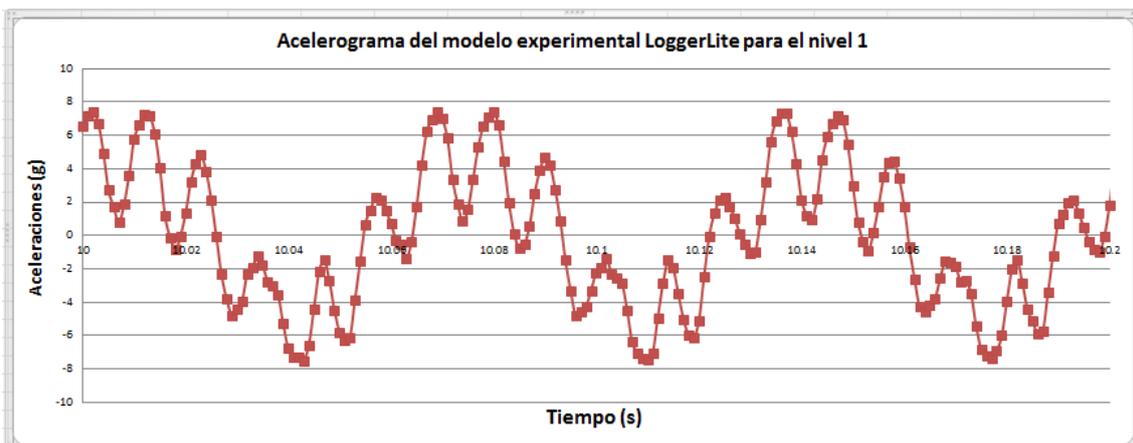


Figura33: Acelerograma del modelo experimental LoggerLite para la losa del nivel 1 en un rango de 10s a 10.2s.

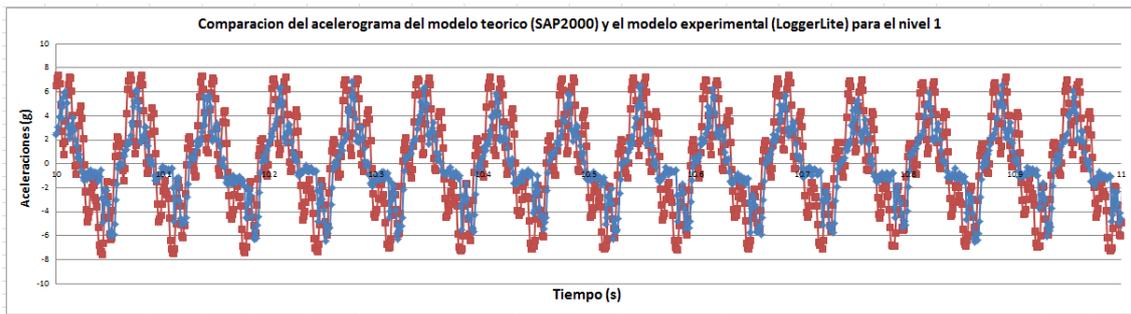


Figura 34: Comparaciones de los acelerogramas del modelo teórico SAP 2000 (azul) y el modelo experimental LoggerLite (rojo) para la losa del nivel 1 en un rango de 10s a 11s.

Una vez obtenidas las gráficas de aceleración generadas por un acelerograma proveniente de una estructura de 2GL sin amortiguadores, se procede a modelar los amortiguadores viscosos en el programa SAP2000.

Primeramente, se efectúan los pasos del Anexo A y Anexo B, y adicionalmente se añade un nuevo Time History proveniente del análisis de un modelo estructural de 2GL utilizando amortiguadores viscosos. Una vez definido el nuevo caso de carga, se selecciona Define- SectionProperties – Link SupportProperties Fig. 35 (Esta sección permitirá añadir un nuevo tipo de enlace). En el tipo de soporte se seleccionará Damper, y en este caso se lo llamará AMORTIGUADOR, siendo este el amortiguador 1 a ser utilizado. Seguidamente, se seleccionará el recuadro de dirección U1, Nonlinear y en las propiedades se escribirá una rigidez infinita, de tal manera que el único parámetro para regular el amortiguamiento será el Coeficiente de Amortiguamiento, ésto se muestra en la Fig. 36.

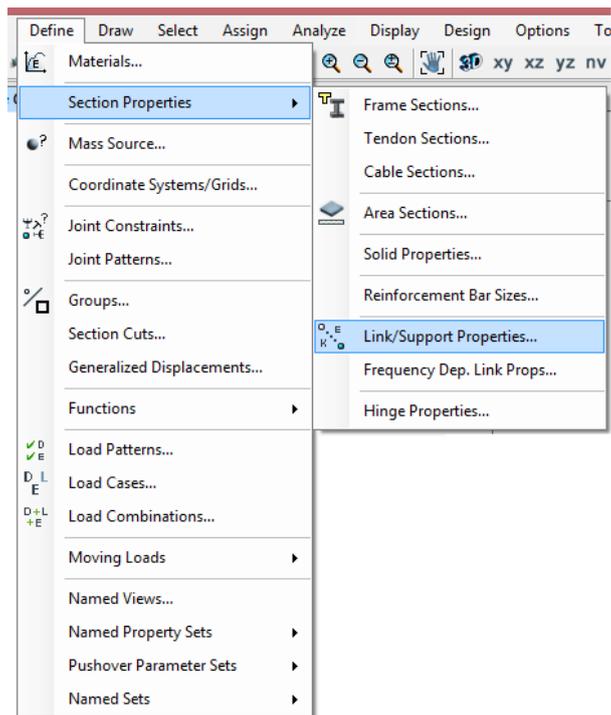


Figura 35: Opción Link/SupportProperties

Link/Support Property Data

Link/Support Type: Damper

Property Name: AMORTIGUADOR Set Default Name

Property Notes: Modify/Show...

Total Mass and Weight

Mass	<input type="text" value="0."/>	Rotational Inertia 1	<input type="text" value="0."/>
Weight	<input type="text" value="0."/>	Rotational Inertia 2	<input type="text" value="0."/>
		Rotational Inertia 3	<input type="text" value="0."/>

Factors For Line, Area and Solid Springs

Property is Defined for This Length In a Line Spring:

Property is Defined for This Area In Area and Solid Springs:

Directional Properties

Direction	Fixed	NonLinear	Properties
<input checked="" type="checkbox"/> U1	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Modify/Show for U1...
<input type="checkbox"/> U2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Modify/Show for U2...
<input type="checkbox"/> U3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Modify/Show for U3...
<input type="checkbox"/> R1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Modify/Show for R1...
<input type="checkbox"/> R2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Modify/Show for R2...
<input type="checkbox"/> R3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Modify/Show for R3...

Fix All Clear All

Link/Support Directional Properties

Identification

Property Name: AMORTIGUADOR

Direction: U1

Type: Damper

NonLinear: Yes

Properties Used For Linear Analysis Cases

Effective Stiffness:

Effective Damping:

Properties Used For Nonlinear Analysis Cases

Stiffness:

Damping Coefficient:

Damping Exponent:

OK Cancel

Figura 36: Propiedades del amortiguador1.

Una vez definidas las propiedades del amortiguador 1 se realiza el mismo procedimiento pero definiendo un nuevo amortiguador 2, que posee las mismas características que el amortiguador 1 sin embargo el coeficiente de amortiguamiento es de 0.8. Una vez definidos los amortiguadores se selecciona Draw- Draw 2 Joint Link y se inserta el amortiguador 1 en los nodos de la Losa Nivel 0 a la Losa nivel 1; por otra parte se inserta el amortiguador 2 en los nodos de la Losa Nivel 1 a la Losa nivel 2. En el ejemplo de la Fig. 37, se conecta el amortiguador 1 del Nodo 27 al Nodo 32, por otro lado se conecta el amortiguador 2 del Nodo 32 con el Nodo 28.

Una vez implementados los amortiguadores, el modelo teórico en el programa SAP2000 debe lucir de la siguiente manera:

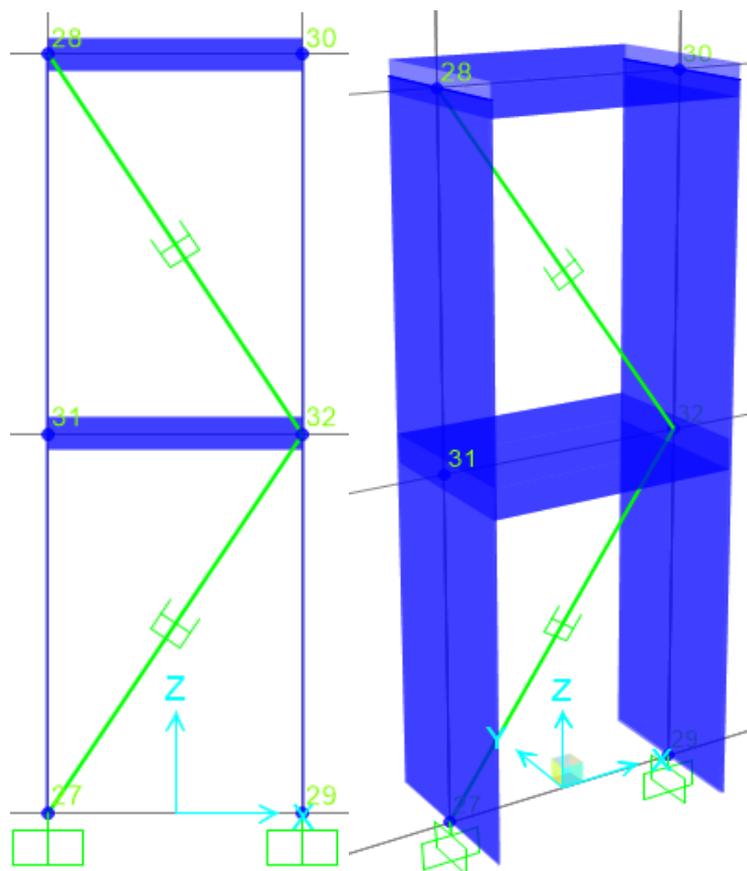


Figura 37: Vista frontal y vista extruida del modelo teórico diseñado en SAP2000 implementado amortiguadores.

Con los amortiguadores implementados en la estructura, se corre el programa tal y como se explica desde la Fig. 22 hasta la Fig. 27. Una vez realizado este procedimiento, se puede visualizar las gráficas del acelerograma 1, y las aceleraciones de la Losa nivel 1 y la Losa nivel 2 Fig. 38. Estos acelerogramas también serán exportadas en un archivo tipo texto y analizadas en el programa Excel, tal como se explica en el Anexo B.

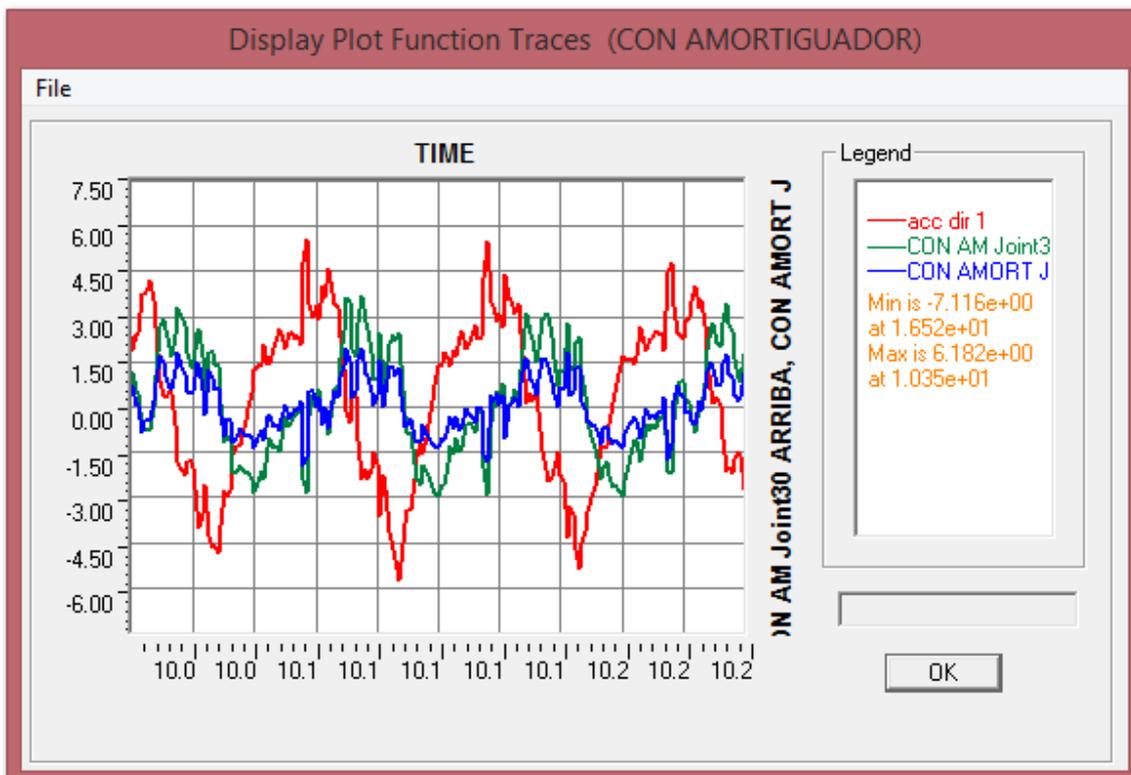


Figura 38: Graficas de la aceleración 1, de la aceleración en el nivel 1 y nivel 2 del modelo estructural diseñado en SAP2000 con amortiguadores

Una vez exportadas las tablas de datos en un libro de Excel, se puede graficar ambas aceleraciones de los distintos niveles y compararlas entre sí.



Figura 39: Acelerograma base con amortiguadores ingresado al programa SAP2000 en un rango de tiempo de 10s a 10.2s.

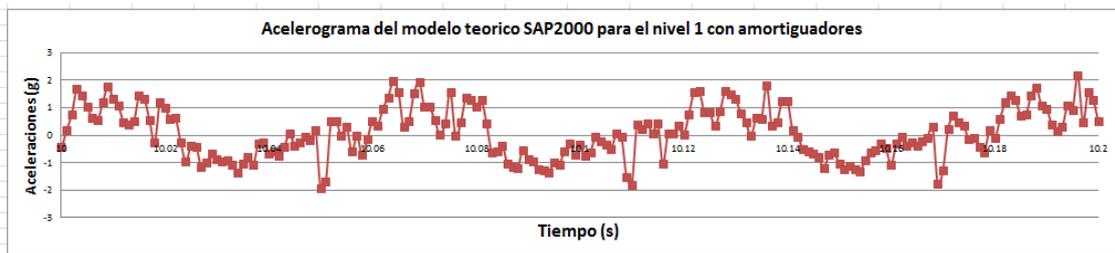


Figura 40: Acelerograma del modelo teórico SAP2000 para la losa nivel 1 con amortiguadores en un rango de tiempo de 10s a 10.2s.

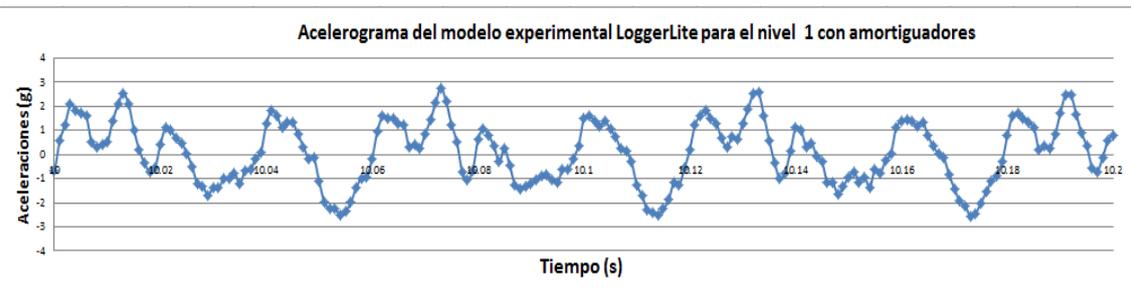


Figura 41: Acelerograma del modelo experimental LoggerLite para la losa nivel 1 con amortiguadores en un rango de tiempo de 10s a 10.2s.

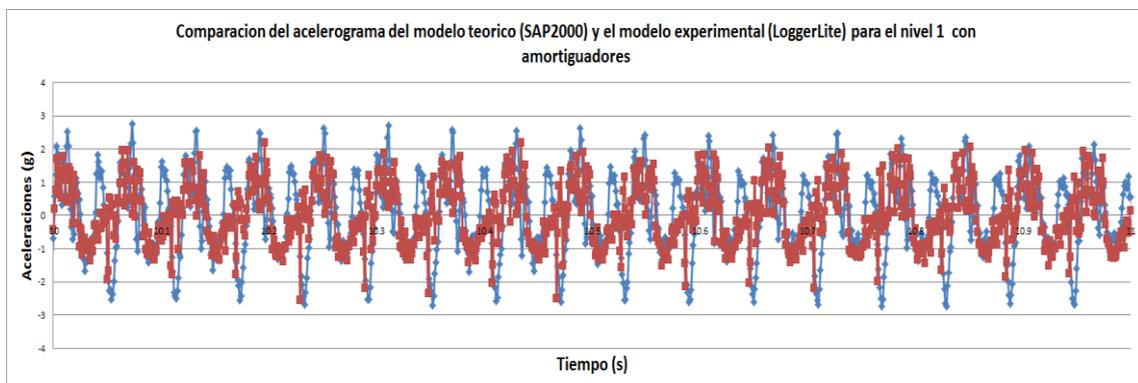


Figura 42: Comparaciones de los acelerogramas del modelo teórico SAP2000 (rojo) y el modelo experimental LoggerLite (azul) para la losa del nivel 1 con amortiguadores en un rango de 10s a 11s.



Figura 43: Acelerograma del modelo teórico SAP2000 para la losa nivel 2 con amortiguadores en un rango de tiempo de 10s a 10.2s.

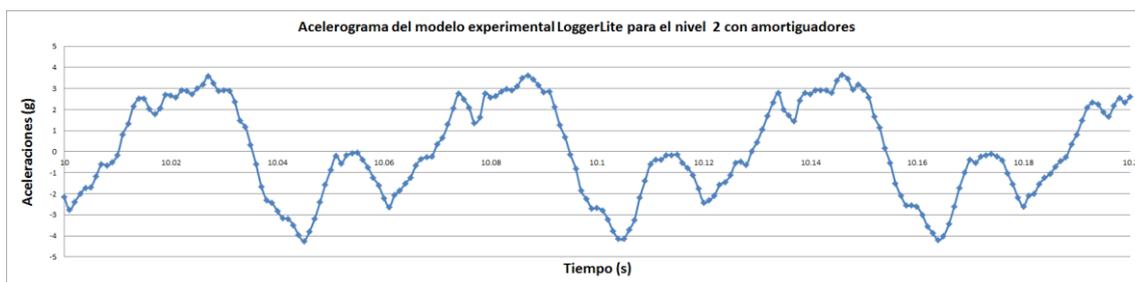


Figura 44: Acelerograma del modelo experimental LoggerLite para la losa nivel 2 con amortiguadores en un rango de tiempo de 10s a 10.2s.

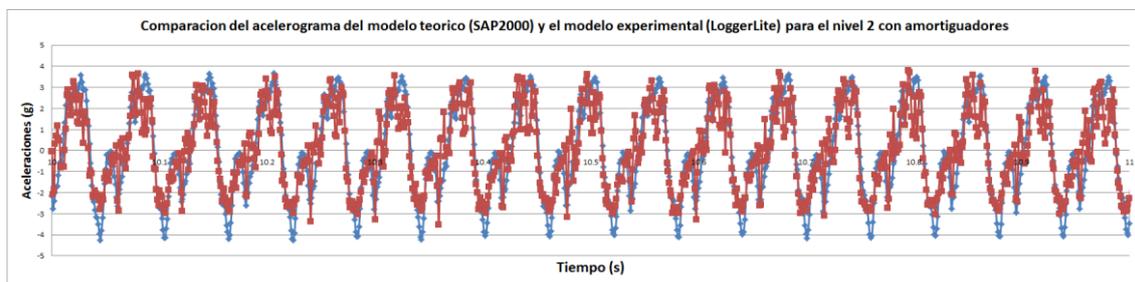


Figura 45: Comparaciones de los acelerogramas del modelo teórico SAP2000 (rojo) y el modelo experimental LoggerLite (azul) para la losa del nivel 2 con amortiguadores en un rango de 10s a 11s.

CAPÍTULO 3: RESULTADOS Y ANÁLISIS DEL PROCEDIMIENTO EJECUTADO

Modelo estructural a escala

Una vez conocidas las dimensiones de la mesa de excitación dinámica, así como también las dimensiones del amortiguador viscoso (jeringa 60ml), se diseñó las dimensiones de un modelo estructural. Conocidas las dimensiones que debían tener tanto las losas, las columnas y la base, se buscó los materiales adecuados que posean una rigidez adecuada. Esta rigidez debía ser lo suficientemente flexible para visualizar los desplazamientos producidos por el motor eléctrico. De igual manera debía ser resistente ante la fatiga y no sufrir deformaciones al ser sometido a dichas aceleraciones.

El primer modelo se lo realizó en base a un tubo de aluminio de 5mm de diámetro (Anexo D), conjuntamente con una masa de acero simulada como losa. Los inconvenientes de este primer modelo fueron:

- La estructura resulto muy rígida y los desplazamientos no se pudieron apreciar, visualmente.
- El amortiguador viscoso (jeringa de 60ml) no se lo podía mantener fijo en la estructura, al recibir algún tipo de fuerza, este se desprendía del modelo.

Pese a que el material del primer modelo de un grado de libertad era demasiado rígido para los propósitos de este trabajo experimental, se decidió implementar a este modelo estructural dos niveles más. Con esto se pretendía que a mayor altura, se podría visualizar de una manera más notoria los desplazamientos

generados por una aceleración en la base. Sin embargo, el modelo estructural con dos y tres grados de libertad (Anexo D), no mostraron unos datos convincentes para continuar con el proceso de análisis, por lo que se decidió cambiar el material.

Ya que los tubos de aluminio no eran óptimos para el análisis, se utilizó placas de acero laminado para las columnas y madera triplex para las losas. Al construir un nuevo modelo, se decidió fabricarlo de 3 grados de libertad, con dimensiones presentadas en Anexo D y Figuras 12 y 13. Las características de este modelo estructural eran las siguientes:

- Al ser de 3 grados de libertad con una altura total de 63cm, las deformaciones se podían apreciar de una mejor manera, en especial en el nivel 3, ya que es el punto más alto de la estructura.
- La incorporación y adaptación a la mesa de excitación dinámica no tuvo mayor dificultad.
- Este modelo se comportó acorde con la aceleración transmitida desde la base por medio del motor eléctrico.
- Sin embargo al momento de adaptar los amortiguadores viscosos en la estructura, estos carecían de un desplazamiento visual en el pistón. Es decir que al utilizar un amortiguador viscoso por cada nivel de la estructura (Anexo D), éstos aportaban con un amortiguamiento muy superior a la aceleración utilizada. Por ende no se podía apreciar al funcionamiento del amortiguador en el modelo.

Con una idea más clara del funcionamiento del acero en las columnas del modelo estructural, y de las maderas (losas) en cada nivel; se optó por trabajar y analizar un modelo de dos grados de libertad con los mismos materiales.

El modelo final al cual se sometieron las aceleraciones provenientes de la mesa de excitación dinámica, respondió de tal manera que se pudo visualizar claramente los desplazamientos en los diferentes niveles de la estructura. Adicionalmente, los amortiguadores trabajaron perfectamente y se constató de manera visual como los pistones del amortiguador reaccionaron ante una fuerza mínima.

Cabe recalcar que tanto los desplazamientos en cada nivel de la estructura como por parte del pistón del amortiguador no se los midió; Esto se debe a que no se posee de la instrumentación adecuada para registrar dichos desplazamientos en tiempos de 0.001 segundos. Además, los desplazamientos que se pueden constatar son relativamente pequeños, por lo que se decidió utilizar un modelo de 2 grados de libertad con una altura total de 42cm y descartar un modelo de un solo grado de libertad que apenas tiene una altura de 21cm, esto se lo hizo para evidenciar la influencia de los amortiguadores en la estructura.

Implementación de Amortiguadores Viscosos en la Estructura

Uno de los primeros parámetros a considerar para la elaboración y fabricación del modelo estructural eran las dimensiones y propiedades de un amortiguador viscoso que actúe ante fuerzas mínimas, que posea un fluido ideal y sobre todo se adapte a las dimensiones impuestas por la mesa de excitación dinámica.

En primera instancia se intentó utilizar un amortiguador de 275mm de largo a base de gas, que es utilizado para las compuertas de los muebles de cocina. (Anexo

F).Sin embargo la fuerza necesaria para que este amortiguador actúe, es de 12 Kgf. Si se implementaba este dispositivo en la estructura, trabajaría no como un amortiguador viscoso, sino como una sección diagonal rigidizada. Por ello se optó por buscar amortiguadores que son implementados en juguetes, tales como grúas, palancas mecánicas, etc. A pesar de que se halló este tipo de amortiguadores utilizados en juguetes (Anexo F), sus dimensiones alcanzaban una longitud máxima de 10cm, por lo que no serían adecuados para el análisis. Por otro lado, también se analizó la posibilidad de utilizar amortiguadores viscosos que trabajan complementariamente con resortes, sin embargo este proyecto busca únicamente el trabajo del fluido de un amortiguador viscoso, masno del resorte.

Finalmente, se escogió trabajar con jeringas de 60 ml selladas herméticamente. Al ser selladas, el único componente que trabaja ante la reacción de una fuerza externa es la capacidad de compresión del aire. Este tipo de amortiguador viscoso posee un fluido ideal que en este caso es aire, el cual reacciona ante fuerzas mínimas generadas por aceleraciones de +5g. Además del fluido utilizado, las jeringas de 60mlconstan de dimensiones adecuadas con respecto a la mesa de excitación dinámica. Por estas razones se eligió este dispositivo para que trabaje como amortiguador viscoso ante una aceleración externa que es implementada en un modelo estructural de dos grados de libertad.

Características del amortiguador viscoso en SAP2000

Una vez realizado el proceso de almacenamiento de datos provenientes del modelo experimental utilizando el programa LoggerLite, se ingresa el acelerograma base en el programa SAP2000 como se muestra en el Anexo A y B. Definida la función

de Time History, y seleccionada la propiedad de asignar un "Link" como se muestra en la Fig. 35, el factor a cambiar en la Fig. 36 de DampingCoefficient, es alterado de tal manera que el programa de elementos finitos SAP2000 muestre un acelerograma similar al almacenado en LoggerLite.

Cabe recalcar que en la Fig.36 se muestra que el programa SAP2000 requiere el ingreso de 3 propiedades para el tipo de análisis no lineal. En primera instancia se tiene la rigidez, en la cual se asigna una rigidez infinita, en este caso 100000 unidades. Esto se debe a que la fuerza de un sistema viscoso, Ecuación 9.1, depende únicamente del coeficiente de amortiguador, la velocidad aplicada y el exponente de amortiguador.

En este caso la velocidad aplicada viene dada por el acelerograma ingresado al programa SAP2000. Para el exponente de amortiguador se asigna un valor de 1, tal como se explica en la metodología en sistemas viscosos. Por ende el único valor a ser modificado es el coeficiente de amortiguamiento, que en este caso se asigna un valor de 2.3 para el amortiguador 1 y 0.8 para el amortiguador 2. Asignados estos valores, como se muestra en la Fig. 36, los acelerogramas provenientes del programa SAP2000 son relativamente similares a los acelerogramas almacenados con el programa LoggerLite.

Para poder establecer que se necesitan definir dos tipos de amortiguadores en la estructura, se corrió el análisis utilizando un solo tipo de amortiguador para los dos niveles modelados en SAP2000. A pesar de que se asignaron varios valores altos y valores bajos, los acelerogramas mostrados por el programa no coincidían con los acelerogramas almacenados en LoggerLite. Por ende se concluyó que se necesitan dos

tipos de amortiguadores a ser definidos en SAP2000. Por otra parte, se puede deducir que los amortiguadores utilizados no son perfectos ni tampoco trabajan de una misma manera tanto en el nivel 1 como en el nivel 2.

Uno de los atenuantes a este comportamiento, es que las jeringas de 60ml son selladas herméticamente utilizando cautín. Al momento que se sellan utilizando el calor del cautín, la dimensión en la punta de la jeringa cambia una de la otra. Adicionalmente, al momento de implementar los amortiguadores viscosos en la estructura experimental, su base es recortada de manera similar con gran precisión, mas nó de manera perfecta. Por otra parte, se debe tener en cuenta de cuanto aire es comprimido y su reacción ante una fuerza proveniente de una aceleración en la base.

En este trabajo no se midió ni se comprobó la fuerza que ejerce la compresión del aire en las jeringas de 60ml. Esto se debe a la falta de instrumentación para medir fuerzas mínimas. Cabe recalcar que el objetivo de este trabajo es asignar las propiedades correspondientes al programa SAP200 (Fig. 36) de tal manera que las aceleraciones sean idénticas a las provenientes del modelo experimental.

Finalmente, en este trabajo solo se posee un registro visual tipo video del movimiento del pistón en el amortiguador, mas no un registro de desplazamientos que se contemplan al momento de utilizar un amortiguador viscoso en el modelo experimental.

Análisis de acelerogramas del modelo teórico SAP2000 y del modelo experimental LoggerLite

Una vez que se han exportado a Excel tanto los datos del modelo experimental provenientes del programa LoggerLite, como los datos del modelo teórico provenientes del programa SAP2000, se proceden al análisis y comparación de los acelerogramas mostrados en las figuras 28-34 y 39-45. Estas graficas muestran las aceleraciones de los distintos niveles del modelo estructural, con y sin uso de amortiguadores viscosos. En primer lugar se analizan los datos del modelo experimental con y sin uso de amortiguadores viscosos. En segundo lugar se analizan el porcentaje de error en la comparación de los acelerogramas experimentales y teóricos (SAP2000). Finalmente se analizan la semejanza de los acelerogramas teóricos y experimentales con amortiguador.

Acelerogramas del modelo experimental con y sin amortiguadores viscosos Nivel 0.

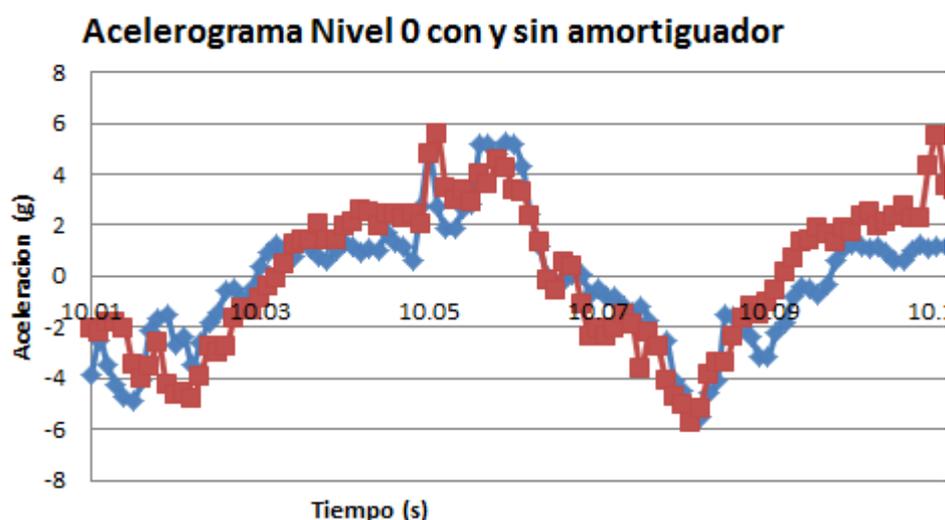


Figura 46: Comparación de los acelerogramas registrados en el modelo experimental con y sin la implementación de amortiguadores viscosos. En un rango de 0.1s

Al momento de almacenar datos sin amortiguadores se configuró al programa LoggerLite que almacene 1000 datos por segundo, por lo que el análisis se lo realizará en un rango de 0s a 1s empezando en el 10mo segundo. Este análisis se presenta en las siguientes tablas comparativas:

Acelerograma Nivel 0 Sin amortiguador	Acelerograma Nivel 0 Con amortiguador
Amplitud Máxima	Amplitud Máxima
5.619 g en t=10.192s	5.589g en t= 10.176s
Amplitud Mínima	Amplitud Mínima
(-)5.472g en t= 10.081s	(-)5.672g en t=10.087s
Periodo de vibración	Periodo de vibración
0.067s	0.062s

Tabla 1: Tabla comparativa de la amplitud y periodo de la aceleración nivel 0 con y sin amortiguador viscoso del modelo experimental.

Para realizar este análisis se comparan las Fig. 28 y Fig. 39 en donde se muestran los acelerogramas almacenados provenientes del modelo experimental en un rango de tiempo de 10s a 10.2s.

La Tabla 1, muestra que el cambio de amplitud máxima entre el uso y no uso del amortiguador es del 0.53%, la amplitud mínima se altera un 3.52%, mientras que el cambio del periodo es del 8%. Esto se debe a que el temporizador que regula la intensidad de vibración del motor eléctrico no posee numeración alguna, por lo que se desconoce que intensidad es la que regula el temporizador. Al momento de encender el motor, puede que se genere un leve cambio en la intensidad, como se muestra en la Tabla 1 es menor al 10%. Estos porcentajes se los calcula utilizando la ecuación 3.1.

$$\text{Porcentaje de error } \% = \frac{\text{Valor Aproximado} - \text{Valor Exacto}}{\text{Valor Exacto}} \times 100 \quad (3.1)$$

Acelerogramas nivel 2 con y sin amortiguadores viscosos

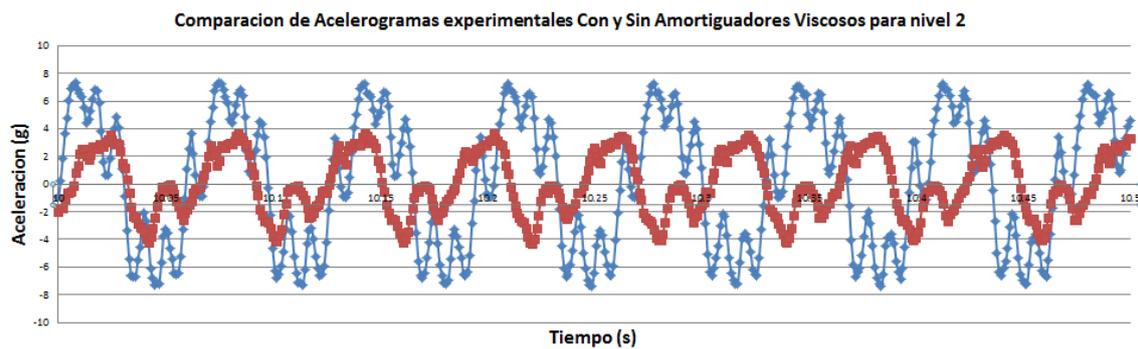


Figura 47: Comparación de Acelerogramas experimentales Con y Sin Amortiguadores Viscosos para nivel 2 en un rango de tiempo de 10s a 10.5s.

Acelerograma Nivel 2 Sin amortiguador	Acelerograma Nivel 2 Con amortiguador
Amplitud Máxima	Amplitud Máxima
7.128 g en t=10.074s	3.622g en t= 10.079s
Amplitud Mínima	Amplitud Mínima
(-)6.809g en t= 10.044s	(-)4.277g en t=10.052s
Periodo de vibración	Periodo de vibración
0.067s	0.062s

Tabla 2: Tabla comparativa de la amplitud y periodo de la aceleración nivel 2 con y sin amortiguador viscoso del modelo experimental.

Se puede apreciar en la Fig. 47 que al momento de utilizar amortiguador viscoso la aceleración es claramente disminuida. Según la Tabla 2, se muestra que la reducción de la aceleración es del 96.76% en la amplitud máxima y 59.2% en la amplitud mínima. Cabe recalcar que se mantienen los mismos periodos de vibración que en los acelerogramas base Nivel 0.

Acelerogramas nivel 1 con y sin amortiguadores viscosos

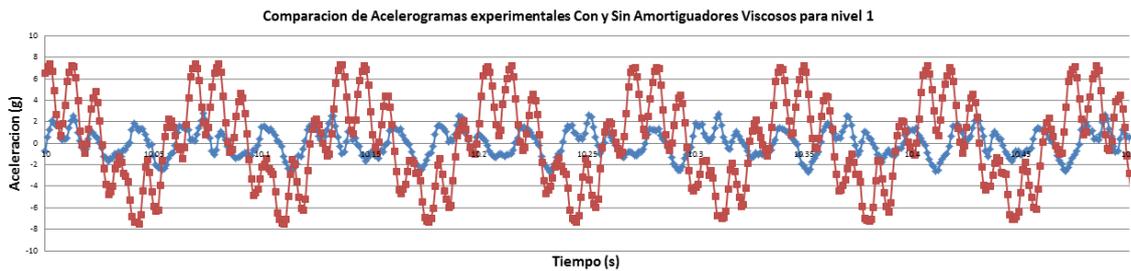


Figura 48: Comparación de Acelerogramas experimentales Con y Sin Amortiguadores Viscosos para nivel 1 en un rango de tiempo de 10s a 10.5s.

Acelerograma Nivel 1 Sin amortiguador	Acelerograma Nivel 1 Con amortiguador
Amplitud Máxima	Amplitud Máxima
7.392 g en t=10.08s	2.756g en t= 10.073s
Amplitud Mínima	Amplitud Mínima
(-)7.466g en t= 10.11s	(-)2.526g en t=10.054s
Periodo de vibración	Periodo de vibración
0.067s	0.062s

Tabla 3: Tabla comparativa de la amplitud y periodo de la aceleración nivel 1 con y sin amortiguador viscoso del modelo experimental.

Se puede apreciar en la Fig. 48 que al momento de utilizar amortiguador viscoso la aceleración es claramente disminuida. Según la Tabla 3, se muestra que la reducción de la aceleración es del 168.2% en la amplitud máxima y 195.6% en la amplitud mínima. Cabe recalcar que se mantienen los mismos periodos de vibración que en los acelerogramas base Nivel 0.

Una vez mostrados los resultados de los acelerogramas tanto para el Nivel 1 como para el Nivel 2, se puede concluir que existe un mayor amortiguamiento en el Nivel1 que en el Nivel 2. Esto se comprueba comparando la reducción de la aceleración en la amplitud máxima del nivel 1, la cual es disminuida en 168.2% mientras que la amplitud máxima del nivel 2 se disminuye al 96.76%. De igual manera se puede comprobar una mayor reducción de la amplitud mínima en el nivel 1 al 195.6%, mientras que en el nivel 2 se reduce tan solo al 59.2%. Estos datos concuerdan con el

incremento del coeficiente de amortiguamiento en el amortiguador 1 al 2.3 mientras que en el amortiguador 2 es del 0.8.

Comparación de los acelerogramas experimentales y teóricos (SAP2000)

DATOS EXPERIMENTALES	DATOS TEORICOS (SAP2000)
SIN AMORTIGUAMIENTO	
Nivel 1	Nivel 1
Amplitud máxima	Amplitud máxima
6.85g	7.02g
Amplitud Mínima	Amplitud Mínima
(-)6.89g	(-)5.92g
Error Total 12.8%	
Nivel 2	Nivel 2
Amplitud máxima	Amplitud máxima
6.52g	6.56g
Amplitud Mínima	Amplitud Mínima
(-)6.71g	(-)6.76g
Error Total	Error Total
Error Total 4.21%	
CON AMORTIGUAMIENTO	
Nivel 1	Nivel 1
Amplitud máxima	Amplitud máxima
1.9569g	1.942g
Amplitud Mínima	Amplitud Mínima
(-)2.542	(-)2.523
Error Total 8.25%	
Nivel 2	Nivel 2
Amplitud máxima	Amplitud máxima
3.55g	3.29g
Amplitud Mínima	Amplitud Mínima
(-)3.87g	(-)2.92g
Error Total 9.21%	

Tabla 4: Tabla comparativa de la amplitud y periodo de la aceleración nivel 1 y nivel 2 con y sin amortiguador viscoso del modelo experimental y modelo teórico.

La Tabla 4, muestra una comparación analítica de las amplitudes máximas y mínimas para los niveles 1 y 2 del modelo estructural experimental y teórico (SAP2000); este análisis también se lo realizó en base al uso del amortiguador viscoso. Las gráficas correspondientes a las comparaciones entre el Nivel 1 experimental y

teórico, se muestra en la Fig. 34, de igual manera la gráfica de comparación con el uso de amortiguadores para el Nivel 1, se muestra en la Fig. 42.

Por otro lado, las gráficas correspondientes a las comparaciones entre el Nivel 2 experimental y teórico, se muestra en la Fig. 31, de igual manera la gráfica de comparación con el uso de amortiguadores para el Nivel 2, se muestra en la Fig. 45.

CAPÍTULO 4: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. El modelo estructural a escala se lo construyó en base a columnas de acero laminado y losas de madera tipo triplex. Este material utilizado para el diseño de las columnas, posee una rigidez que permite visualizar los desplazamientos producidos por la mesa de excitación dinámica, a la cual se empotra el modelo estructural. Por otra parte, este material es resistente a la fatiga, liviano, y no se deforma al ser sometido ante diferentes aceleraciones. Por ende, es un material óptimo para la construcción de modelos estructurales a escala a ser estudiados.
2. A pesar que la mesa de excitación dinámica transmite aceleraciones al modelo estructural diseñado, la mesa solo se desplaza $\pm 1\text{cm}$ en dirección horizontal. Este limitante restringe que se generen fuerzas de mayor magnitud en los distintos niveles del modelo estructural diseñado. Por ende, se recomienda modificar y ampliar el rango de movimiento de la mesa en dirección horizontal.
3. El amortiguador viscoso implementado en este trabajo consta de las características necesarias para el estudio del comportamiento de la estructura cuando se somete a aceleraciones en la base. Sin embargo no consta de precisión para regular el amortiguamiento. Al momento de utilizar dos amortiguadores tipo jeringas de 60ml, la respuesta del amortiguamiento fue diferente para el nivel 1 como para el nivel 2. Al no poder regular que amortiguamiento generan estos dispositivos, solo se los pudo modelar de manera semejante en el programa SAP2000, mas no ajustar con las propiedades exactas.

4. Al momento de implementar algún tipo de amortiguador en alguna estructura o construcción, y además se lo modele en el programa SAP2000, es indispensable que el fabricante de estos dispositivos asegure todas las características y propiedades que deben ser ingresadas al programa SAP2000 para generar una respuesta exacta del comportamiento estructural del modelo.
5. Al implementar amortiguadores viscosos en el modelo estructural, se evidenció de manera visual y analítica la reducción de la aceleración en cada nivel del modelo estructural. Para el nivel 1 se logró disipar la energía proveniente del acelerograma disminuyendo la aceleración hasta en un 195.6%. Por otra parte, se logró alcanzar una disminución de la aceleración para el nivel 2 de hasta un 96.76%. A pesar de que el amortiguamiento no es el mismo para el nivel 1 como para el nivel 2, se comprobó una efectividad promedio de reducción en la aceleración de 146.18% únicamente con amortiguadores viscosos en base de aire.
6. Los acelerogramas registrados en el programa LoggerLite son ondas distorsionadas. Esto se debe a que pueda existir cierta fricción en la mesa de excitación dinámica. Sin embargo, este tipo de aceleraciones mantuvieron el mismo periodo tanto en el nivel 0, 1 y 2. De igual manera cuando se implementó los amortiguadores en el modelo estructural, los periodos se mantuvieron constantes para los tres niveles de estudio.
7. Al momento de analizar y comparar las gráficas de aceleración experimental, con las gráficas de aceleración teórica, se evidenció el mismo comportamiento entre los acelerogramas almacenados del modelo estructural y los acelerogramas producidos por el programa SAP2000. El error generado con el modelo

estructural sin amortiguadores, alcanzo el 12.8% para el nivel 1 y el 4.25 % para el nivel 2. Por otra parte, cuando se diseñó el modelo estructural con amortiguadores, las gráficas generaron un error del 8.25% para el nivel 1, y el 9.21% para el nivel 2. Esto quiere decir que se mantiene un error del 10% aproximadamente. Esto se debe por leves variaciones en la mesa, en las dimensiones exactas de la geometría del modelo estructural, en las propiedades de los materiales definidos y sobre todo, en la definición de las propiedades del amortiguador utilizado.

8. Finalmente, se puede concluir que este tipo de sistemas de reducción de vibraciones, son una opción considerable para proteger y evitar daños en la estructura, que consecuentemente evitara pérdidas humanas y económicas.
9. Se recomienda realizar más estudios con mesas de excitación dinámica que generen una mayor aceleración en la base, de tal manera que las fuerzas en los distintos niveles de la estructura alcancen una cantidad mínima de 10Kgf. Con este tipo de fuerzas se puede diseñar estructuras y amortiguadores que si existen en el mercado, tales como los amortiguadores en base a gas.
10. Se recomienda continuar el estudio de la implementación de amortiguadores en modelos estructurales. Ya que si se implementan amortiguadores viscosos en base de aire se puede reducir hasta un 195.6%, la aceleración proveniente de un sismo a escala, materiales más sofisticados y amortiguadores con mecanismos de regulación del amortiguamiento puedan llegar a desaparecer completamente las aceleraciones en las estructuras.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aviles, R. 201. *Dispositivos para el control de vibraciones*. Tesis Ing. Civil en Obras Civiles Valdivia. Universidad Austral de Chile.
- Burkett J. (2015) *SAP2000 (v.9) Tutorial od modal analysis, CES 6209 Structural Dynamics*, Department of civil and environmental engineering , University of Central Florida.
- Chopra, A. K. (2001) *Dynamics of structures. Theory and applications to earthquake engineering*. 2ed. New Jersey, Prentice Hall.
- Computers and Structures, Inc. [computersNstructures].(2011, Junio 12).*SAP2000 - 01 Introductory Tutorial: Watch & Learn*. [Archivotipovideo]. Recuperado desde <https://www.youtube.com/watch?v=2povDdw2pTQ>
- Computers and Structures, Inc. [computersNstructures]. (2011, Junio 8). *SAP2000 - 04 Mass and Modal Analysis: Watch & Learn*. [Archivotipovideo]. Recuperadodesde <https://www.youtube.com/watch?v=3ZbKg-oVC5I>
- Computers and Structures, Inc. [computersNstructures]. (2011, Junio 9). *SAP2000 - 11 Modal Time History Analysis: Watch & Learn*. [Archivotipovideo]. Recuperadodesde https://www.youtube.com/watch?v=VjkqA4_hlMk
- Computers and Structures, Inc. [computersNstructures]. (2014, Mayo 12). *SAP2000 - 29 Fast Nonlinear Analysis: Watch & Learn*. [Archivotipovideo]. Recuperado desde <https://www.youtube.com/watch?v=ufbFG9e4yjU>

Molestina M. (2014) Diseño, fabricación y ensayo de una mesa de excitación dinámica para modelos estructurales a escala. Tesis de Ing, Civil. Quito. Universidad San Francisco de Quito.

Morrison Ingenieros. [Carlos Ibarcena Lajo]. (2012, Mayo 12). *ej09 sap2000 q aisladores amortiguadores th a*. [Archivo tipo video]. Recuperado desde <https://www.youtube.com/watch?v=wIYfxK2sTog>

Edwards, C. H., & Penny, D.E. (2009). *Ecuaciones diferenciales y problemas con valores en la frontera*. Naucalpan de Juarez: Pearson Education.

Gatica, V. (2012). Respuesta sísmica de un edificio de estructura metálica con aisladores. Alternativas de diseño, Tesis de Master universitario en ingeniería de las estructuras, cimentaciones y materiales. Madrid. Universidad Politécnica de Madrid.

Haskell, G., Lee, D. (2015). *Fluid viscous damping as an alternative to base isolation*. Taylor devices Inc. Recuperado desde <http://www.taylordevices.com/fluidviscousdamping.html>

Kassimali, A. (1999). *Análisis estructural*. México D. F.: Thomson Learning.

Oviedo, J. Duque, M. (2006, 12). *Sistemas de control de respuesta sísmica en edificaciones*. Revista EIA Escuela de Ingeniería de Antioquia, Vol N.6, 105-120

Paz, M. (2002). *Dinámica Estructural Teoría y cálculo*. Barcelona: Editorial Reverte S.A.

Trevor E. Kelly. (2001, 07). *In-Structure damping and energy dissipation - Design guidelines*. Holmes Consulting Group. Nueva Zelanda

Uliarte, R. (1998). Sistemas pasivos de disipación de energía para la reducción de vibraciones en estructuras: análisis y diseño. Tesis Mag. IEG. Santiago. Pontificia Universidad Católica de Chile.

Vinakota, S (2006). Estructuras de acero: comportamiento y LRFD. Mexico D.F. McGraw-Hill Interamericana.

Wilson, Edward L. (2000). Three dimensional static and dynamic analysis of structures. 3 ed. Computers and Structures, Inc. Berkeley, California, USA. 2000

ANEXO A: ALMACENAMIENTO DE DATOS EN EL PROGRAMA LOGGERLITE

Una vez instalado el programa LoggerLite en el computador se procede a conectar cada acelerómetro tipo Vernier Low-g Accelerometer, en el sensor de interface, LabQuest Mini, para la recolección de información.

Iniciado el programa en el computador se puede regular las unidades para el almacenamiento de la información, en este caso se utilizarán las unidades de aceleración g. Se utilizan estas unidades para poder compararlas con el modelo teórico diseñado en el programa SAP2000.

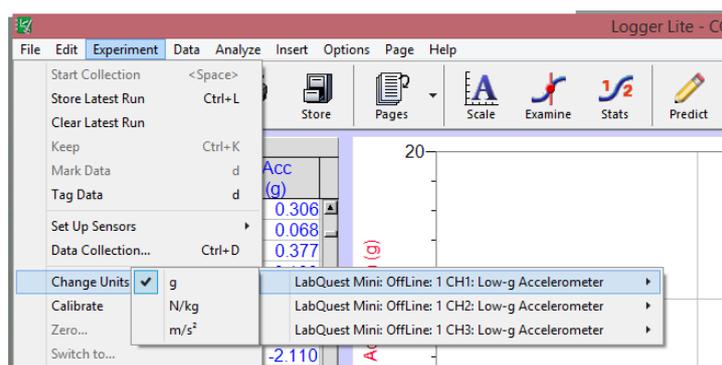


Fig. 1: Cambio de unidades para la recolección de datos.

De esta manera los resultados se mostrarán en unidades de aceleración tipo g.

Latest			
Time (s)	Acc (g)	Acc (g)	
994	0.993	2.226	0.306
995	0.994	2.315	0.068
996	0.995	2.278	0.377
997	0.996	2.622	-0.199
998	0.997	2.422	-1.214
999	0.998	2.422	-2.169
1000	0.999	2.248	-2.203
1001	1.000	2.215	-2.110
1002	1.001	2.145	-2.024
1003	1.002	2.089	-1.612
1004	1.003	3.875	-0.656
1005	1.004	5.295	0.043
1006	1.005	4.581	0.366
1007	1.006	3.864	0.005
1008	1.007	2.954	0.068
1009	1.008	2.928	0.355
1010	1.009	2.581	0.288

Acceleration
2.089 g

Acceleration 2
-1.612 g

Fig. 2: Ejemplo de datos en unidades g almacenadas en cierto tiempo.

Cambiadas las unidades, se encera cada acelerómetro para que la recolección de la información parta de una base 0.

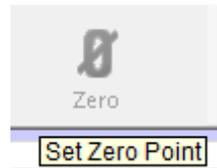


Fig. 3: Icono que permite encerar las unidades

Enceradas las unidades se incrementa la capacidad de recolección de datos de información. Esto se lo realiza en Experiment – Data Collection. La cual desplegará la siguiente pantalla:

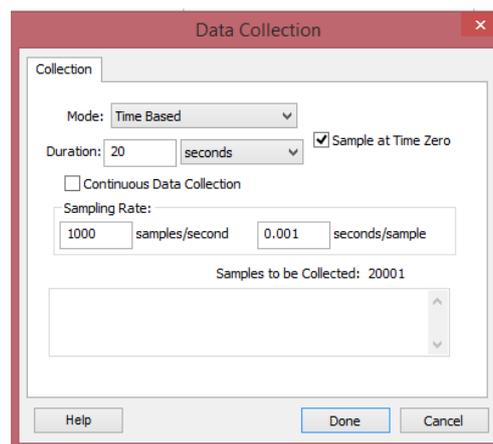


Fig. 4: Pantalla de regulación de datos.

En este caso se incrementó la cantidad de datos a ser recolectados por segundo, 1000 samples/second. Esto permitirá que la información almacenada sea más precisa, de igual manera al momento de ingresar esta información en el programa SAP2000, los gráficos de aceleración por segundo serán mucho más acondicionados a la realidad.

Una vez almacenada la información se la exporta como texto y se la guarda para que pueda ser analizada posteriormente utilizando el programa Excel.

ANEXO B: MODELO DE PÓRTICO Y ACELEROGRAMAS EN EL PROGRAMA DE ELEMENTOS FINITOS SAP2000

Diseño del modelo estructural a escala de 2GL en SAP2000, asignando propiedades de sección

Para poder modelar la estructura experimental en el programa SAP2000, se debe empezar iniciando el programa en nuevo modelo- tipo 2D Frames, cabe recalcar que las unidades a ser utilizadas son Kgf, cm, C.

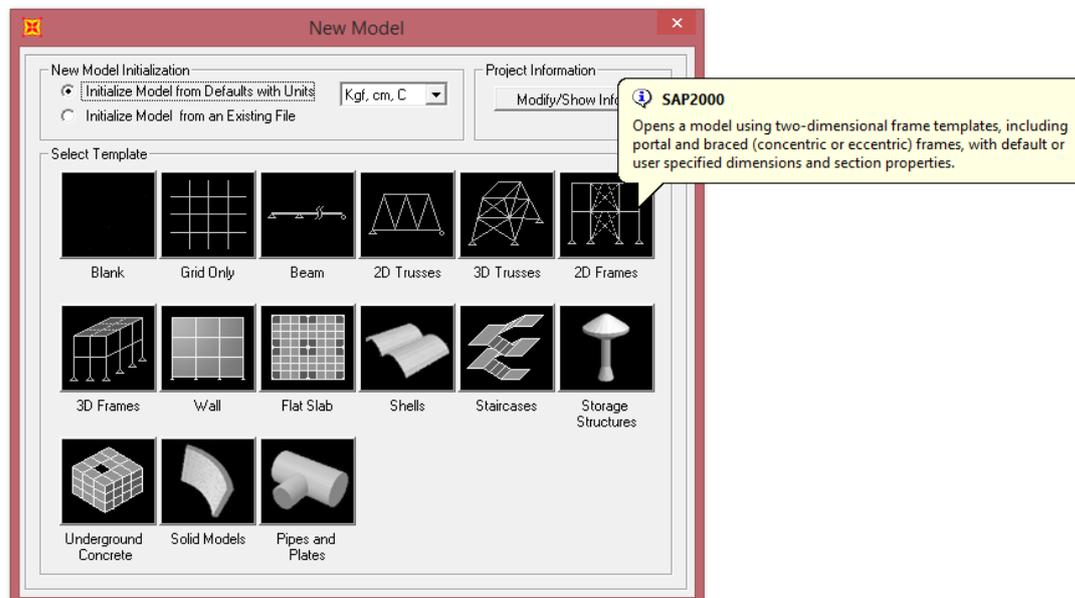


Fig. 1: Nuevo modelo a utilizarse en el programa SAP2000 utilizando 2D Frames.

Posteriormente se definen el número de pisos y de secciones que tendrá el nuevo modelo, en este caso se define un modelo de 2 Stories, de 21 cm y 1 Bay de 14 cm, las propiedades de las secciones serán modificadas posteriormente.

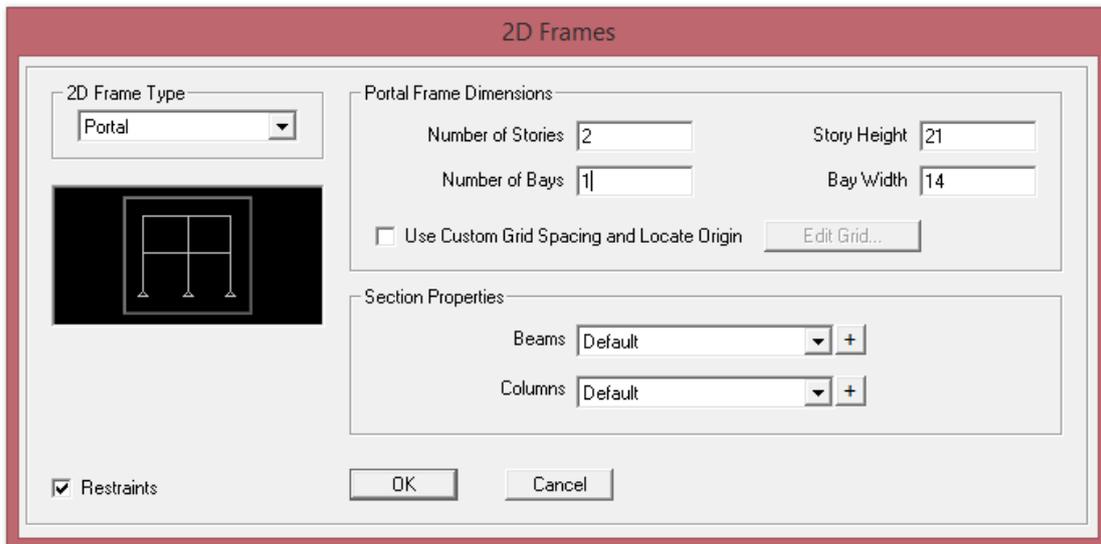


Fig. 2: Se ingresan las dimensiones del pórtico a ser utilizado.

Definidas las dimensiones del pórtico, se procede a definir las secciones. Esto se lo realiza en Define- SectionProperties – FrameSections, el cual desplegará la Fig.3, mostrando la posibilidad de añadir una nueva sección.

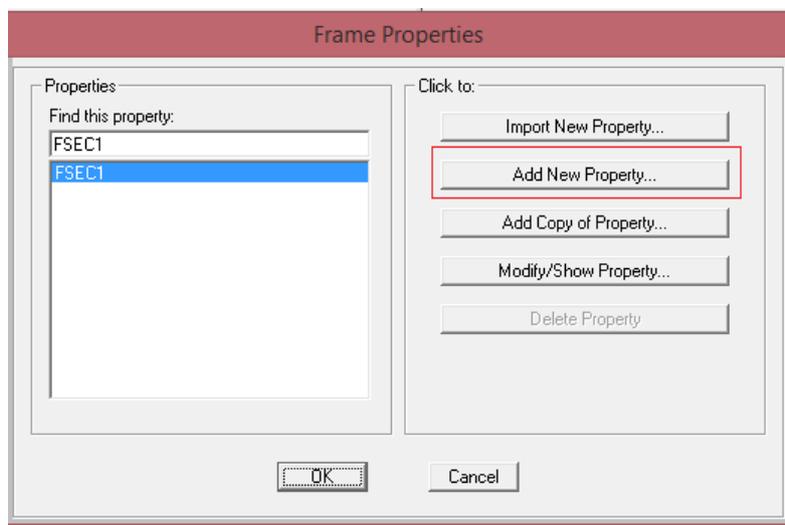


Fig.3: Cuadro de propiedades de marco

Después se selecciona la sección tipo “Tee” y se añaden las dimensiones de las columnas, en este caso de 10cm de largo, y 0.22 milímetros de ancho, las dimensiones y propiedades de material (Acero Gr. 50) se muestra en la Fig.4.

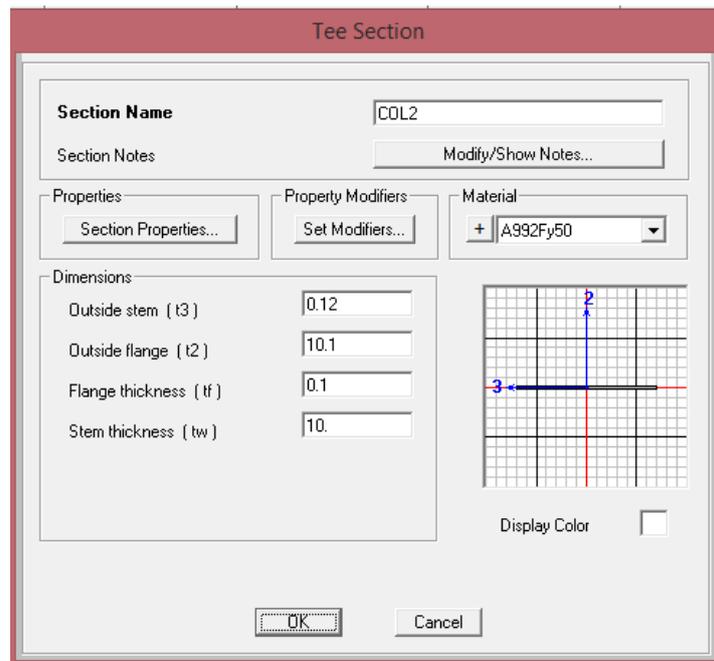


Fig.4: Propiedades de la columna de acero

Una vez definidas las secciones de columnas y el material a utilizarse, se define una nueva sección rectangular, con un nuevo material a definirse de Madera. Esta nueva sección se la añade como tipo Other, y posteriormente SectionDesigner, tal como se muestra en la Fig5.

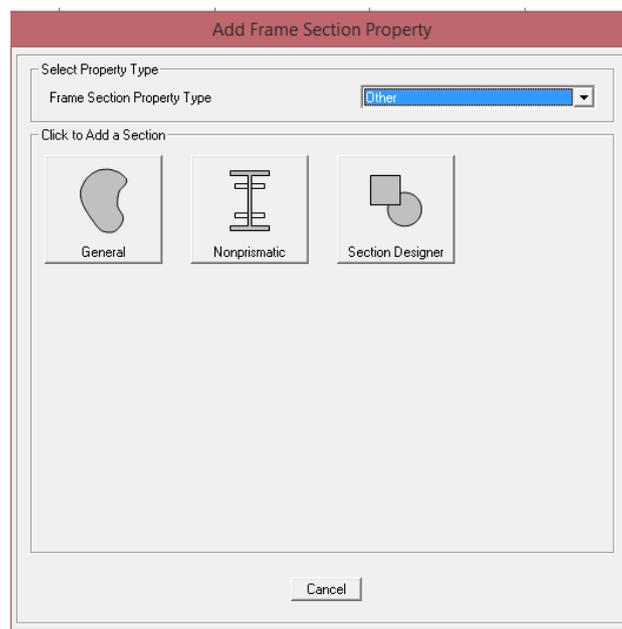


Fig. 5: Se selecciona un nuevo tipo de sección.

Abierta la ventana de SectionDesigner, se selecciona Draw- Draw Solid Shape – Rectangle, luego se aplasta clic derecho sobre el dibujo y se despliega una ventana de propiedades, aquí se define el ancho y largo de la sección, en este caso de 10cm x 1.5cm. Esto se muestra en la Fig6.

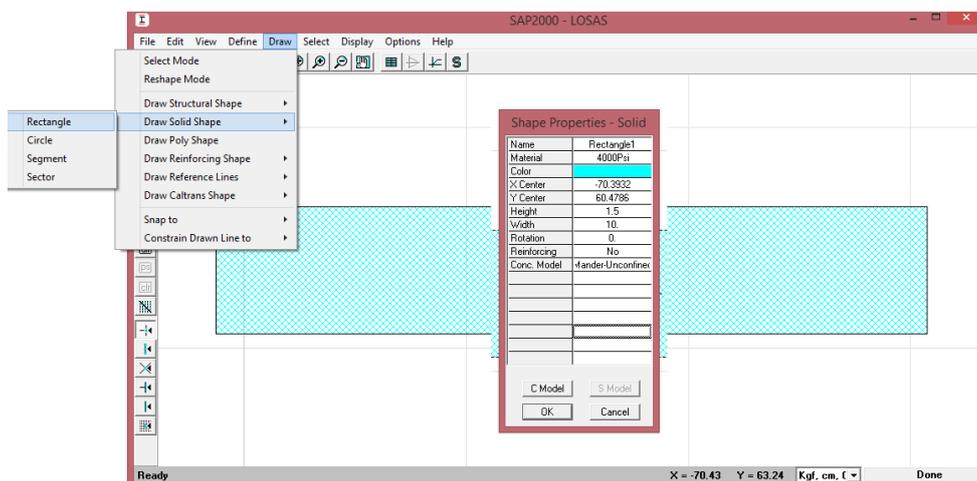


Fig. 6: Propiedades del nuevo sólido.

Definido el nuevo sólido, se añade un nuevo material, en este caso se llamará Madera y se definen sus propiedades como módulo de elasticidad y densidad. Esto se muestra en la Fig.7:

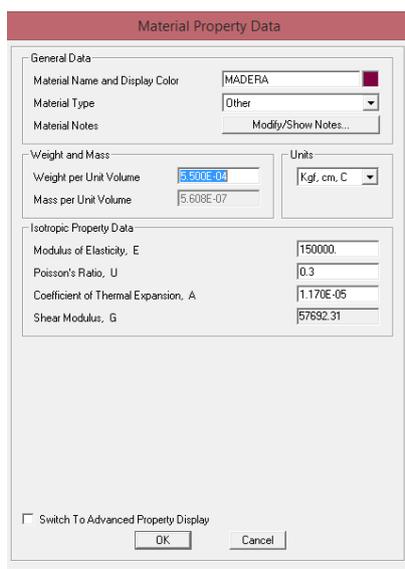


Fig.7: Detalle de las propiedades del nuevo material definido.

Definidas las secciones de las columnas como de las losas, se las asigna utilizando Assign- Frame- FrameSections y se asigna Col2 para las columnas y Losa para las losas. Realizada y definida la estructura, se selecciona los joints de la base y se especifica las restricciones para modelar un sistema empotrado. Esto se lo realiza en Assign- Joints- Restraints y se utiliza la opción de empotramiento que impide el movimiento en cualquiera de las 6 direcciones. Una vez definida la base, la estructura debe lucir como la Fig.8, y se procede a especificar el acelerograma utilizado.

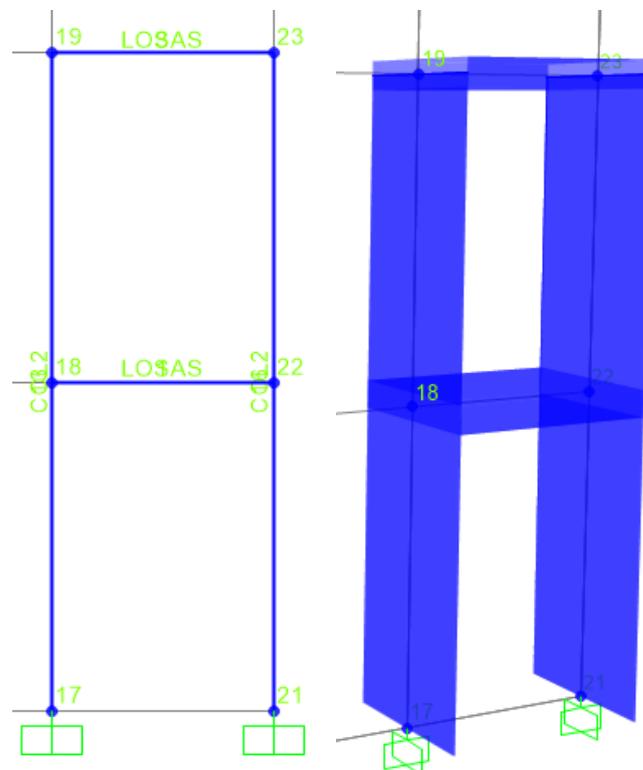


Fig.8: Vista Frontal y vista extruida del modelo estructural.

Ingreso de datos del programa LoggerLite a Excel y SAP(2000)

Previamente antes de poder definir el acelerograma a ser utilizado en SAP2000, se busca el archivo de texto almacenado por el previamente por el programa LoggerLite. Este archivo de texto consta de cuatro parámetros: tiempo, aceleración 1, aceleración 2 y aceleración 3. Como se conoce que cada dato almacenado es en un tiempo de 0.001s y

que el acelerograma base es aceleración 1, únicamente se debe seleccionar esta columna de datos.

Para poder seleccionar solo la columna de aceleración 1, se abre el programa Excel y se selecciona abrir, se busca el documento de texto proveniente del programa LoggerLite y se selecciona que se abra en la pantalla desde la fila 7, tal como muestra la Fig. 9:

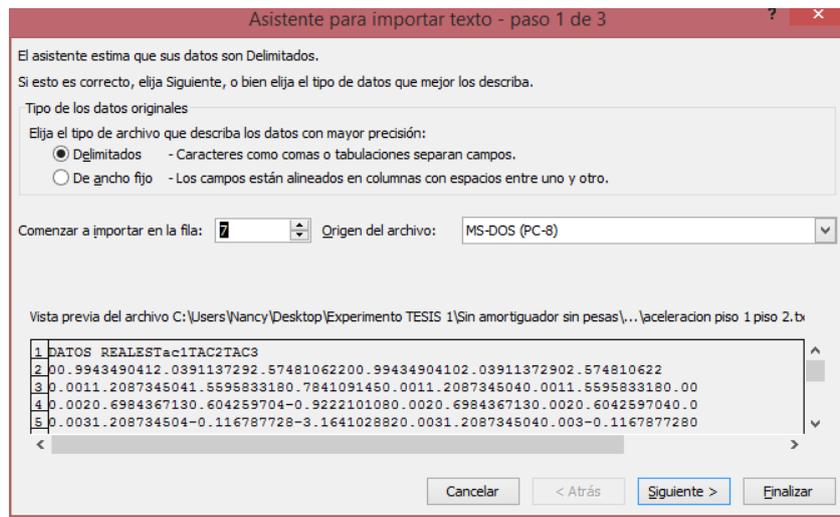


Fig. 9 : Cuadro de texto abierto en Excel.

Después se selecciona Siguiente y se selecciona separar los datos por Tabulación. En algunos casos puede ser preferible seleccionar también Espacio Fig.10 Cuando se finaliza la acción, se tendrá en pantalla de Excel 4 columnas diferentes, mostrando el tiempo, la aceleración 1, la aceleración 2, y la aceleración 3.

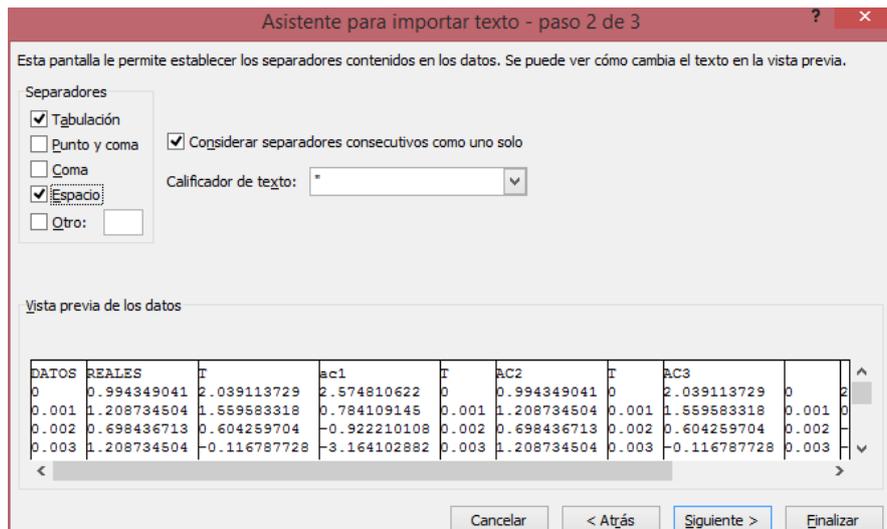


Fig.10: Asistente de importar texto a un cuadro de Excel.

Una vez con los datos en Excel, se selecciona la columna de la aceleración 1, se la copia y se la pega en NotePad. Este archivo se lo guarda como Aceleración 1 tipo texto.

Es muy importante seguir estos pasos de Excel, para únicamente ingresar el acelerograma de aceleración 1 en SAP2000. Estos pasos se los debe realizar tanto con los archivos de acelerogramas sin amortiguadores y con ellos.

Ingreso de acelerogramas (Time History) en el programa SAP2000

Almacenado el archivo de aceleración 1 tipo texto, es posible ingresarlo al programa SAP2000. Para poder definir el acelerograma se selecciona en Define-Functions-Time History, tal como muestra la Fig.11. Seleccionada esta opción, se despliega un cuadro que permite incorporar una nueva función desde un archivo. Se selecciona en añadir nueva función y aparecerá el cuadro de la Fig.12.

Se selecciona Browse y se busca el archivo tipo texto con el nombre de Aceleración 1, el cual consta únicamente de la aceleración proveniente del

acelerómetro 1. Ya seleccionado este archivo, se especifica que los valores tendrán intervalos iguales de 0.001s. También se puede especificar que los datos comiencen a ser seleccionados omitiendo ciertos valores, esto se utiliza cuando el archivo seleccionado consta de una breve descripción del archivo. En este caso se escribirá 5 líneas de ser omitidas del archivo Aceleración 1.

Especificados todos estos parámetros en la definición de la función Time History, se selecciona DisplayGraph para poder tener una idea del acelerograma a utilizarse. También se puede seleccionar en View File para constatar los valores ingresados al programa.

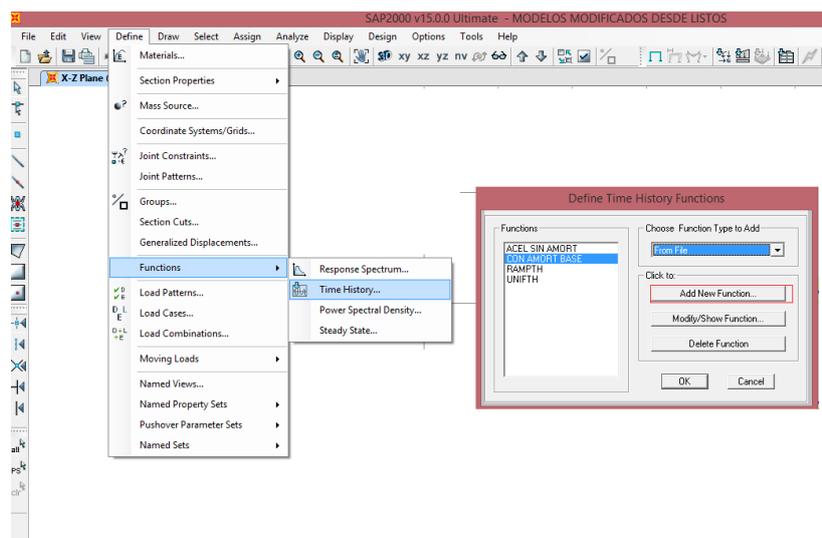


Fig.11: Selección de una función tipo Time History y cuadro de definición de la función.

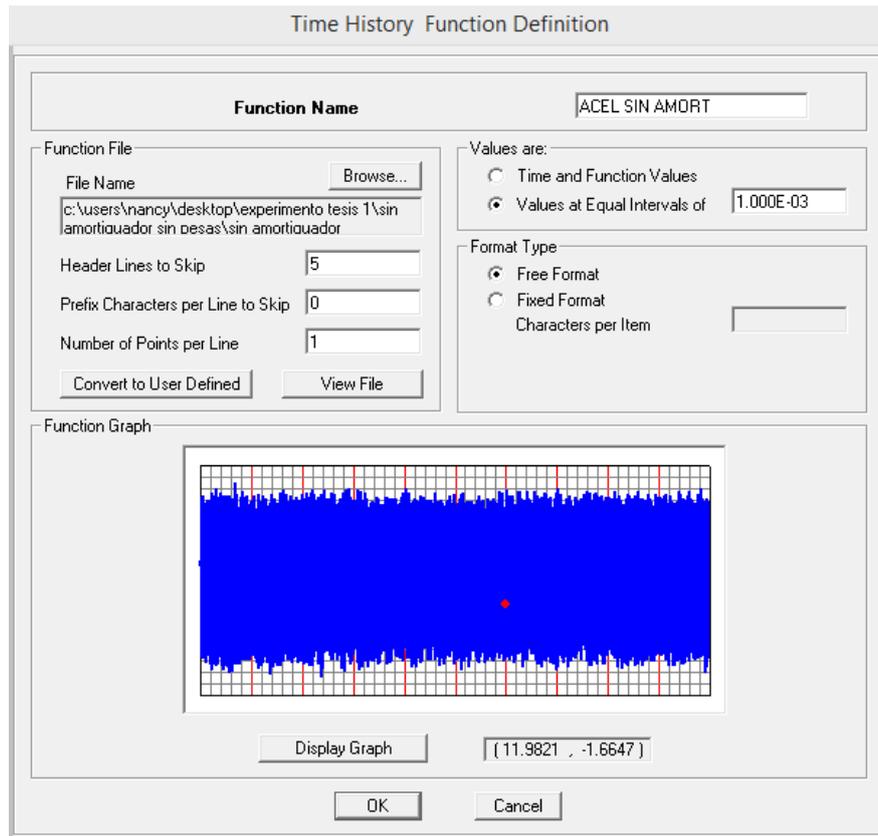


Fig. 12: Definición de la función Time History.

Definida la función Time History, se procede a seleccionar Define-Load Cases. En este cuadro Fig.13, se podrá definir todas las cargas y acciones a ser evaluadas en el programa. Para la carga muerta o Dead Load Case no se altera ningún valor y se la deja tal cual se muestra la Fig.14.

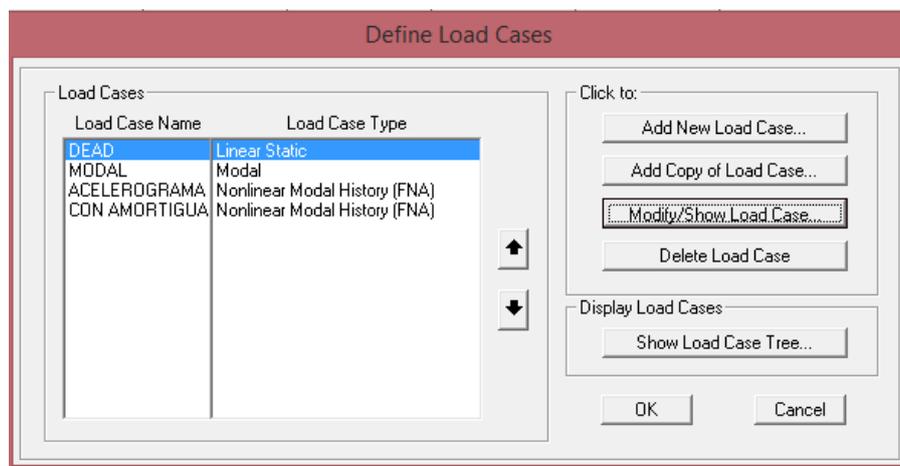


Fig.13: Se asigna los tipos de carga a ser analizados

Load Case Data - Linear Static

Load Case Name: DEAD [Set Def Name]

Notes: [Modify/Show...]

Load Case Type: Static [Design...]

Stiffness to Use:

- Zero Initial Conditions - Unstressed State
- Stiffness at End of Nonlinear Case

Important Note: Loads from the Nonlinear Case are NOT included in the current case

Analysis Type:

- Linear
- Nonlinear
- Nonlinear Staged Construction

Loads Applied:

Load Type	Load Name	Scale Factor
Load Pattern	DEAD	1.
Load Pattern	DEAD	1.

[Add] [Modify] [Delete] [OK] [Cancel]

Fig.14: Caso de la Carga Muerta o Dead Load Case.

Para el caso de la Carga Modal Fig. 15, se selecciona Ritz Vectors, en el tipo de Modos y se añaden las cargas aplicadas de aceleración, carga muerta y posteriormente de Link el cual servirá para definir el amortiguador.

Especificado el caso de carga Modal, se define un nuevo caso de carga Fig16, este nuevo caso se lo nombrara AcelerSIN. Se lo llama así ya que consta de un acelerograma 1 que fue almacenado por el programa LoggerLite cuando se analizó la estructura de 2GL sin amortiguadores. Para este nuevo caso de carga, se selecciona Load Case-Type "Time History" Nonlinear y se selecciona la carga que es aplicada. En este caso es la función previamente definida Aceleración 1. A esto se selecciona un factor de escala de 1; esto se lo realiza para que los datos computarizados también se muestren en unidades de aceleración g. Además se ingresa el número de datos a ser analizados, 20000, con su debido tiempo de separación de 0.001s entre ellos. Finalmente se define la constante de amortiguamiento de la estructura de 0.02 típica para una estructura de acero.

Load Case Data - Modal

Load Case Name: Notes:

Load Case Type:

Stiffness to Use

Zero Initial Conditions - Unstressed State

Stiffness at End of Nonlinear Case

Important Note: Loads from the Nonlinear Case are NOT included in the current case

Type of Modes

Eigen Vectors

Ritz Vectors

Number of Modes

Maximum Number of Modes:

Minimum Number of Modes:

Loads Applied

Load Type	Load Name	Maximum Cycles	Target Dynamic Participation Ratios (%)
Accel	UX	0	0.
Accel	UX	0	0.
Load Pattern	DEAD	0	0.
Link	All	0	0.

Fig.15: Detalle del caso de carga tipo Modal

Load Case Data - Nonlinear Modal History (FNA)

Load Case Name: Notes:

Load Case Type:

Initial Conditions

Zero Initial Conditions - Start from Unstressed State

Continue from State at End of Modal History

Important Note: Loads from this previous case are included in the current case

Analysis Type

Linear

Nonlinear

Time History Type

Modal

Direct Integration

Modal Load Case

Use Modes from Case:

Time History Motion Type

Transient

Periodic

Loads Applied

Load Type	Load Name	Function	Scale Factor
Accel	U1	ACEL SIN AI	1.
Accel	U1	ACEL SIN AMOD	1.

Show Advanced Load Parameters

Time Step Data

Number of Output Time Steps:

Output Time Step Size:

Other Parameters

Modal Damping:

Nonlinear Parameters:

Fig. 16: Detalle del caso de carga tipo Time History.

ANEXO C: MESA DE EXCITACIÓN DINÁMICA



Fig. 1: Vista superior de Mesa de estación dinámica en el cual se acopla el modelo estructural a escala.



Fig. 2: Vista lateral de la mesa de excitación dinámica, en donde se muestra el temporizador que enciende el motor y regula su intensidad.



Fig. 3: Motor eléctrico de la mesa de excitación dinámica conectado a una reducción de velocidad por varias poleas.



Fig. 4: Carriles de Acero en donde se asienta la base móvil, y por ende el modelo estructural a escala.

ANEXO D: MODELOS ESTRUCTURALES REALIZADOS



Figura 1: Primer modelo estructural construido



Figura 2: Segundo modelo estructural construido de 2GL.



Figura 3: Tercer modelo estructural construido, con y sin amortiguadores.



Figura 4: Cuarto modelo estructural construido con y sin amortiguadores.



Figura 5: Modelo final adaptado a la mesa de excitación dinámica.

ANEXO F: AMORTIGUADORES ANALIZADOS PARA ESTE PROYECTO



Fig.1: Amortiguador a gas de longitud máxima de 275mm resistente ante fuerzas equivalentes a 12Kgf.



Fig. 2: Amortiguadores viscosos implementados en grúas de juguete que trabajan ante fuerzas mínimas.



Fig. 3: Amortiguadores Viscosos que actúan con la implementación de un resorte.



Fig. 4: a) Jeringa de 60ml b) Jeringas de 60ml selladas herméticamente para ser utilizadas como amortiguadores viscosos.