

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



Manual de análisis para sistemas de amortiguadores viscosos
para riostras en estructuras metálicas

Trabajo de graduación presentado por Romeo Rubén Mont López para
optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería civil

Guatemala,

2020

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



**Manual de análisis para sistemas de amortiguadores viscosos
para riostras en estructuras metálicas**

Trabajo de graduación presentado por Romeo Rubén Mont López para
optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería civil


Guatemala,

2020

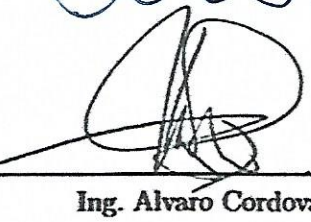
Vo.Bo.:

(f) 
Ing. Pedro Martínez

Tribunal Examinador:

(f) 
Ing. Pedro Martínez

(f) 
Ing. Robert Godo Levensen

(f) 
Ing. Alvaro Cordova

Fecha de aprobación: Guatemala, 5 de Diciembre de 2020.

Mi interés personal en el desarrollo de este trabajo de tesis surgió por mi inclinación personal en el área del diseño de estructuras, buscando una solución para los problemas mas comunes en el momento de diseñar una estructura y proponiendo un sistema alternativo.

La elaboración de este trabajo no hubiera sido posible sin el apoyo de muchas personas. En primer lugar están mi padre Otto Mont quien me ha dado su apoyo incondicional, su comprensión y consejos. A Mi madre Gissella López que ha sido un soporte emocional y guía a lo largo de toda mi vida.

A mi amigo y asesor Pedro Martínez que me estuvo apoyando durante todo el trabajo y me ha dado oportunidades de desenvolverme de manera profesional, mi director de carrera Roberto Godo que me guió y ayudó a lo largo de la carrera.

Al ingeniero Otoniel Echeverría que fue un gran catedrático durante mi carrera, Al arquitecto Al Moshe que siempre mostró interés y preocupación de mi desempeño y aprendizaje y al ingeniero Hugo Pallais que considero un excelente profesional y un modelo a seguir.

A mis amigos mas cercanos: Bryan Chan, Christian Alvarado, Cristian Ruiz, Allan Tun, Manolo Capilla, Kervin Cardona, Esdras Tello, Sergio De León, Esmeralda Canahui que siempre me apoyaron, me consolaron y motivaron cuando mas los llegue a necesitar.

Quiero darle especial agradecimiento a Kelly Berduo que sin ella no habría logrado llegar tan lejos.

Finalmente quiero agradecer a SeismoSoft que me proporcionaron las licencias para poder utilizar sus programas y así terminar mi tesis.

Prefacio	v
Lista de figuras	xii
Lista de cuadros	xiii
Resumen	xv
Abstract	xvii
1. Introducción	1
2. Justificación	3
3. Objetivos	5
3.1. Objetivo general	5
3.2. Objetivos específicos	5
4. Marco teórico	7
4.1. Placas tectónicas.	7
4.2. Movimiento de las placas.	7
4.2.1. Límites de fallas transformantes.	8
4.2.2. Límites divergentes.	8
4.2.3. Límites convergentes.	8
4.2.4. Ondas sísmicas.	8
4.2.5. Tipos de sismos	9
4.3. Geomorfología de Guatemala	10
4.4. Marco geológico de Guatemala	10
4.5. Diseño de estructural.	11
4.5.1. Estructuración.	11
4.5.2. Análisis.	11
4.5.3. Dimensionamiento.	11
4.6. Normas de diseño estructural.	12

4.6.1.	AGIES	12
4.6.2.	Asociación Americana de Ingenieros Civiles.	13
4.6.3.	ASCE 7-16.	13
4.7.	Cargas.	13
4.7.1.	Cargas muertas.	13
4.7.2.	Cargas vivas.	14
4.7.3.	Viento.	14
4.7.4.	Cargas de ceniza.	14
4.8.	El sismo y sus efectos sobre las estructuras.	14
4.9.	Aspectos sísmicos considerados en la NSE-2 capítulo 4.	15
4.9.1.	Sismicidad y nivel de protección.	15
4.9.2.	Clasificación de sitio.	15
4.9.3.	Sismos para diseño estructural	15
4.9.4.	Espectros genéricos para diseño.	16
4.9.5.	Tipos de sismo.	17
4.10.	Acero como material estructural.	17
4.10.1.	Acero ASTM.	17
4.10.2.	Acero ASTM A992.	17
4.10.3.	Acero A572	18
4.10.4.	Tipos de perfiles.	18
4.11.	Sistemas de un grado de libertad.	19
4.12.	Sistemas de control estructural.	19
4.12.1.	Control pasivo.	19
4.12.2.	Control activo.	20
4.12.3.	Control semi activo.	20
4.12.4.	Control híbrido.	20
4.13.	Disipadores fluidos viscosos.	21
4.13.1.	Amortiguadores fluidos viscoso.	21
4.13.2.	Propiedades mecánicas de los amortiguadores.	22
4.13.3.	Comportamiento de la fuerza del amortiguador.	22
4.13.4.	Ciclo de histéresis.	23
4.13.5.	Relación de amortiguamiento de estructuras con los amortiguadores viscosos.	23
4.13.6.	Relación de estructuras con amortiguadores viscosos no lineales	25
4.13.7.	Configuraciones de soportes de apoyo.	26
4.14.	Análisis de tiempo historia	28
4.14.1.	Registros de movimiento de la Tierra.	28
5.	Metodología	31
5.1.	Tipología de la estructura.	31
5.2.	Cargas	31
5.2.1.	Cargas vivas	31
5.2.2.	Cargas muertas	32
5.3.	Aspectos sísmicos	32
5.3.1.	Sismo para diseño estructural.	32
5.3.2.	Ajuste por clase de sitio.	33
5.3.3.	Ajustes por intensidades sísmicas especiales.	33
5.3.4.	Periodo de vibración de transición.	34

5.3.5.	Probabilidad nominal de ocurrencia de los sismos de diseño	34
5.3.6.	Calibración de los parámetros sísmicos.	35
5.3.7.	Espectros genéricos probables.	35
5.3.8.	Componente vertical del sismo de diseño.	35
5.3.9.	Aceleración máxima del suelo (AMS)	36
5.3.10.	Espectros sísmicos.	36
5.4.	Modelado de la estructura en ETABS.	36
5.4.1.	Modelado de los elementos principales.	36
5.4.2.	Definición de elementos columnas y vigas.	37
5.4.3.	Espectro sísmico de respuesta.	40
5.4.4.	Patrones de carga.	40
5.4.5.	Combinaciones de carga.	41
5.4.6.	Fuente de masa.	41
5.4.7.	Asignación de cargas a losas.	42
5.4.8.	Asignación de diafragmas rígidos.	42
5.4.9.	Restricción de la base.	43
5.4.10.	Ajuste de casos de carga.	43
5.4.11.	Configuración del mallado.	44
5.5.	Análisis de la estructura sin riostras.	44
5.6.	Análisis tiempo-historia.	45
5.6.1.	Obtención de registros sísmicos.	45
5.6.2.	Aplicación de SeismoSelect.	45
5.6.3.	Configuración del caso de sismo máximo creíble.	50
5.6.4.	Configuración de caso Modal.	51
5.6.5.	Configuración de caso gravitacional no lineal.	51
5.6.6.	Configuración de análisis tiempo historia en ETABS.	52
5.6.7.	Matcheado de acelerogramas con espectro máximo creíble.	53
5.6.8.	Cálculo del factor de reducción de respuesta.	56
5.6.9.	Cálculo del amortiguamiento efectivo.	58
5.6.10.	Modelado matemático del disipador viscoso.	58
5.7.	Diseño preliminar de los disipadores fluidos viscosos.	59
5.7.1.	Configuración del sistema	59
5.7.2.	Cálculo de la rigidez	59
5.7.3.	Cálculo del coeficiente de amortiguamiento (C)	60
5.7.4.	Resolución de la ecuación del coeficiente de amortiguamiento (C)	60
5.7.5.	Modelado de la estructura con los disipadores fluidos viscosos.	66
5.8.	Análisis del disipador.	69
5.8.1.	Verificación lazo histérico.	69
5.8.2.	Balance de energía del sistema.	69
5.8.3.	Análisis de distorsión de entrepiso.	70
5.9.	Selección de amortiguador apropiado.	70
5.10.	Interacción del proceso hasta que cumpla según el AISC 7-16.	72
6.	Resultados	73
6.1.	Reducción de derivas.	73
6.2.	Balance de energía del sistema.	76
6.2.1.	Reducción de cortante sobre la estructura.	77
6.3.	Demanda contra capacidad de los elementos estructurales.	77

7. Conclusiones	81
8. Recomendaciones	83
9. Bibliografía	85
10. Anexos	89
10.1. Glosario	89

Lista de figuras

1.	Distribución y nombre de las placas tectónicas en el mundo.	7
2.	Tipos de límites de placas tectónicas	8
3.	Límites de placas tectónicas en Guatemala.	10
4.	Nivel de Protección Sísmica y probabilidad del sismo de diseño del código NSE 2.	15
5.	Mapa de zonificación sísmica de Guatemala del código NSE 2.	16
6.	Sección transversal de perfil W	19
7.	Ecuación de energía absoluta de Uang y Bertero	21
8.	Pistón de disipación de fluido viscoso.	22
9.	Relación entre fuerza y velocidad en los tipos de disipadores viscosos	23
10.	Bucles de histéresis de amortiguadores con comportamiento viscoso puro y visco-elástico	23
11.	Disipación de energía W_d en un ciclo de movimiento armónico y deformación W_s	25
12.	Estructura n pisos con sistemas de amortiguadores con diferentes configuraciones.	27
13.	Aceleración del suelo con registros de Coalinga del año 1983	29
14.	Tabla de cargas vivas para edificaciones	32
15.	Espectro elástico.	36
16.	Opciones para el inicio del modelado.	37
17.	Configuración de ejes y pisos.	37
18.	Menú de definición de secciones.	38
19.	Configuraciones de distintos tipos de secciones.	38
20.	Vista 3D de la estructura.	39
21.	Definición de elemento losa.	39
22.	Definición del espectro de respuesta en ETABS.	40
23.	Definición de patrones de carga.	40
24.	Definición de las combinaciones de carga.	41
25.	Definición de la fuente de masa.	41
26.	Asignación de cargas a las losas.	42
27.	Definición y asignación de diafragmas.	42
28.	Restricción de la base.	43

29.	Configuración de casos de carga.	43
30.	Asignación del mallado.	44
31.	Carga de combinaciones de diseño	44
32.	Centro de datos de movimiento de suelo.	45
33.	Interfaz de selección de parámetros de SeismoSelect.	46
34.	Posibles registros de aceleración.	46
35.	Definición de espectro objetivo.	47
36.	Ingreso de espectro de AGIES.	47
37.	Selección de registros.	48
38.	Gráficas de los registros seleccionados.	48
39.	Descarga de registros.	49
40.	Descarga de PEER Ground Motion Database.	49
41.	Sismo máximo creíble.	50
42.	Configuración de caso modal.	51
43.	Configuración de caso gravitacional no lineal.	52
44.	Ventana de definición de análisis tiempo historia.	52
45.	Configuración de acelerogramas.	53
46.	Configuración de acelerogramas.	54
47.	Configuración del macheado del acelerograma.	54
48.	Configuración del caso de carga.	55
49.	Configuración del amortiguamiento mínimo en el caso de carga.	56
50.	Valores de distorsión límite según Hazus.	56
51.	Resultados del análisis sin amortiguadores viscosos fluidos.	57
52.	Locación de los disipadores fluidos viscosos a lo ancho.	59
53.	Ángulo de inclinación del disipador.	61
54.	Derivas por casos modales.	61
55.	Participación de modos fundamentales de la estructura.	64
56.	Definición de propiedades del disipador fluido viscoso.	67
57.	Ingreso de parámetros para la configuración del disipador	67
58.	Vista de la estructura con disipadores fluidos viscosos a lo largo.	68
59.	Vista de la estructura con disipadores fluidos viscosos a lo ancho.	68
60.	Curva de histéresis de los disipador fluido viscoso.	69
61.	Tabla de energía de los componentes de la estructura.	70
62.	Derivas por piso de la estructura.	70
63.	Fuerzas máximas en los disipadores de energía.	71
64.	Fuerzas máximas en los disipadores de energía.	71
65.	Fuerzas máximas en los disipadores de energía.	72
66.	Reducción de derivas en dirección X de la estructura.	73
67.	Reducción de derivas en dirección Y de la estructura.	74
68.	Balance de energía del sistema.	76
69.	Gráfica de energía de ETABS.	76
70.	Fuerza cortante de la estructura.	77
71.	Verificación de elementos estructurales.	78
72.	Detalles del diseño del elemento Columna.	78

Lista de cuadros

1.	Parámetros de diseño sísmico.	33
2.	Valores por ajustes de sitio para la estructura.	33
3.	Factores para periodos cortos y largos utilizados.	34
4.	Valores de las ordenadas espectrales.	34
5.	Factores K_d de acuerdo al nivel de sismo	35
6.	Valores calibrados del espectro sísmico.	35
7.	Resumen de registros sísmicos.	50
8.	Resumen de valores de distorsiones para la aplicación de la ecuación 37	58
9.	Factor de reducción de respuesta.	58
10.	Rigidez del sistema	60
11.	Pesos por piso típico	60
12.	Normalización de las derivas del modo fundamental de la estructura.	62
13.	Desplazamiento relativo de la estructura.	62
14.	Coefficientes de amortiguamiento.	65
15.	Cálculos para determinar el coeficiente de amortiguamiento.	66
16.	Valor del coeficiente de amortiguamiento.	66
17.	Fuerza máxima del arreglo de los disipadores.	71
18.	Reducción de derivas en dirección X de la estructura.	74
19.	Reducción de derivas en dirección Y de la estructura.	74
20.	Deriva en dirección X contra deriva objetivo según el límite de daño.	75
21.	Deriva en dirección Y contra deriva objetivo según el límite de daño.	75
22.	Reducción de fuerza cortante sobre la estructura.	77

Este trabajo plantea las directrices para el análisis de amortiguadores fluidos viscosos en una estructura metálica, Para esto se realizó una estructura metálica de 6 pisos de altura ubicada en una área en el interior de la ciudad de Guatemala, aplicando las normas de seguridad estructural de AGIES para el diseño sísmico.

Se aplicaron metodologías de FEMA y Taylor para realizar el análisis tiempo historia y el diseño de los amortiguadores fluidos viscosos.

Los resultados indican que la estructura necesita dispositivos con una capacidad de 1500kN con una configuración de 8 por piso.

Estos demostraron reducir las derivas de la estructura en un 81 % en ambas direcciones de la estructura haciendo que estas cumplan las derivas máximas permitidas por las normas de seguridad estructural, una disipación de energía del 90 % y una reducción de la fuerza cortante del 47 %.

Por lo tanto los dispositivos son capaces de absorber la energía del sismo y así reducir los esfuerzos en la estructura disminuyendo el daño de la estructura.

This work raises guidelines for the analysis of viscous fluid dampers in a metallic structure. To do this, a 3-story high metal structure was made in the interior of Guatemala City, applying the structural safety standards for seismic design of AGIES.

FEMA and Taylor Inc design manual were applied to perform the time-history analysis and design of the viscous fluid dampers.

The results indicate that the structure needs devices with a capacity of 1500kN and a configuration of 8 per floor.

They showed a reduction of the structure' drifts by 81 %. in both directions of the structure, making them comply with the maximum drifts allowed by structural safety standards, an energy dissipation of 90 %. and reductions in the shear force of 47 %. therefore, the devices are able to absorb the energy of the earthquake and thus reduces the stresses on the structure making it less vulnerable to damage.

CAPÍTULO 1

Introducción

Debido a la actividad sísmica existente en la región de Guatemala y la vulnerabilidad de las estructuras es necesaria la implementación de nuevas tecnologías que protejan mejor la estructura, sus ocupantes y su contenido, de los efectos de las fuerzas sísmicas.

Los enfoques tradicionales del diseño consisten en la combinación de resistencia y ductilidad para soportar las cargas producidas por el sismo.

Todo esto evitando así el colapso de la estructura priorizando la supervivencia de de las vidas de los ocupantes o usuarios de estas.

El manual permitirá emplear un enfoque moderno del diseño que se centra en la adición de dispositivos de amortiguamiento fluidos viscosos, permitiendo así que las estructuras cumplan los requisitos de los códigos mientras que se mantienen secciones mas pequeñas.

Estos dispositivos permiten concentrar la disipación de energía durante un sismo en dispositivos específicamente diseñados para este propósito y así eliminar o reducir el daño en la estructura principal.

Utilizando el programa de modelado ETABS 18 y las metodologías FEMA y el manual de diseño Taylor se modelara una estructura metálica, de 6 pisos con una altura típica de 3.6m, la planta típica tiene 56 metros de ancho y 42 metros de largo teniendo un área de $1715 m^2$.

Para esto se utilizaron las normas de diseño de AGIES, y AISC para complementar las metodologías FEMA y las de Taylor devices inc.

CAPÍTULO 2

Justificación

Debido a las consideraciones geológicas de Guatemala se necesitan de estructuras capaces de soportar dichas fuerzas mientras garanticen la supervivencia de los ocupantes. Este manual contiene tener los lineamientos básicos para el diseño de sistemas de amortiguadores fluidos viscosos.

Este sistema permitirá disipar las energías producidas por el sismo y evitar daños a la estructura principal sin poner en riesgo la integridad y seguridad general de la estructura.

3.1. Objetivo general

Establecer las directrices para el análisis de amortiguadores viscosos fluidos para riostras en estructuras metálicas.

3.2. Objetivos específicos

- Seleccionar registros de aceleración apropiados para el análisis de la estructura.
- Analizar un disipador fluido viscoso con el espectro de respuesta de AGIES.
- Demostrar la reducción de derivas de una estructura con la aplicación de disipadores fluidos viscosos.

4.1. Placas tectónicas.

El núcleo del planeta está formado primordialmente por hierro y níquel, luego la parte del manto que es la parte media de las capas está hecha de silicatos ferro magnesianos, mientras que la litosfera que es la capa externa está conformada por la corteza del manto esta capa tiene un espesor variable y un comportamiento sísmico al de un cuerpo rígido que flota y se desplaza sin un patrón determinado.

El movimiento interno de la litosfera genera una irregularidad en la superficie por lo cual esta está segmentada y son elementos separados llamados placas tectónicas [1]

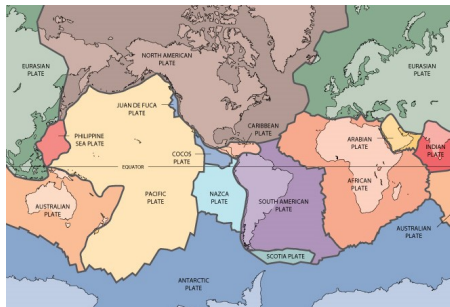


Figura 1: Distribución y nombre de las placas tectónicas en el mundo.

[2]

4.2. Movimiento de las placas.

Las placas son elementos que están constante cambio y movimiento estas placas se mueve como una unidad con respecto a otras placas, si bien el mecanismo que causa el movimiento

de estas aun no está comprendido en su totalidad se ha determinado algunos comportamientos y similitudes. Las interacciones de las placas pueden ser clasificadas la siguiente forma.

4.2.1. Límites de fallas transformantes.

Este tipo de limite también conocido como pasivos se localiza donde una placa se desliza con respecto a otra sin generar un cambio en la la capa de estas. Estas fallas son paralelas a la dirección de movimiento de las placas y están relacionadas a las cordilleras mesoceanicas.

Alguna de estas fallas son tan largas que atraviesan continentes completos, la más famosa de estas es la conocida falla de San Andrés en esta falla la placa del Pacífico se mueve hacia el noreste más allá de la placa norteamericana.

4.2.2. Límites divergentes.

Se refiere a los lugares donde las placas se separan conforme a las lacas e separan se las fracturas creadas se rellenan con roca fundida produciendo roca dura y franjas oceánicas, este también es conocido como constructivo y ejerce esfuerzos tensionales.

4.2.3. Límites convergentes.

En estos límites se ejercen esfuerzos de compresión, en este fenómeno la capa más densa se subduce debajo de otra, este fenómeno es el que sucede en Centro América con la placa de cocos y la placa del Caribe, este efecto es creador de grandes cordilleras montañosas. [3]

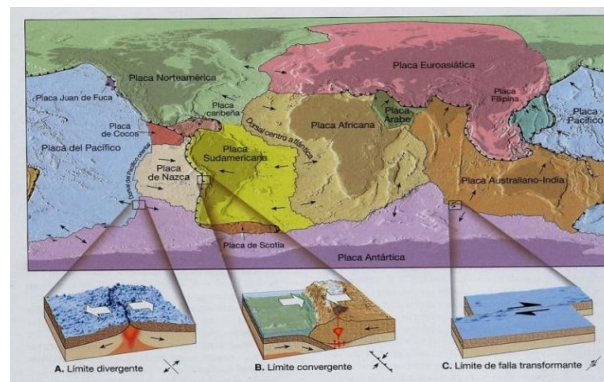


Figura 2: Tipos de límites de placas tectónicas [4]

4.2.4. Ondas sísmicas.

Los sismos son producidos por los movimientos de las placas y las interacciones de los límites de estas, cuando un sismo ocurre se producen tres tipos básicos de ondas, de estas

solo dos se propagan en todas las direcciones en el interior de la tierra. Los tipos de onda son los siguientes:

- Ondas primarias: Estas también conocidas como las ondas P son las más rápidas sus velocidades llegan a ser entre 1100 y 8000 ms dependiendo del tipo de roca. La característica principal de esta onda es que alternadamente comprime y expande la roca en la dirección de su trayectoria, y su propagación no está limitada a los sólidos sino que también se propaga en los líquidos.
- Onda secundarias: Estas llamadas S, viaja a una velocidad mucho menor que las ondas P, su propagación en el material genera deformaciones pero no es capaz de transmitirse en fluidos.
- Ondas superficiales: Estas son propagadas por la parte más superficial de la corteza terrestre, a medida que la profundidad aumenta disminuye la amplitud de su movimiento, estas se pueden clasificar en dos grupos:
 - Ondas Love: Estas fueron llamadas así en honor a su descubridor, estas ondas deforman las rocas similarmente a las ondas S aunque únicamente en dirección horizontal.
 - Ondas Rayleigh: Estas producen movimiento vertical

Cuando sucede una liberación de energía en forma de los terremotos, Lo primero que se siente son las ondas P seguidas de las ondas S de tal manera que sacude la superficie del terreno vertical y horizontalmente y esto es lo que genera los daños a las distintas infraestructuras, mientras que las ondas superficiales son mas lentas que las ondas internas estas dos se complementan debido a sus componentes vertical y horizontal.

4.2.5. Tipos de sismos

Por su origen, los sismos se pueden clasificar como naturales y artificiales, los artificiales son generados por intervención humana en ejercicios como explosiones de armamentos o explotaciones mineras, la cantidad de energía liberada por estos es mínima comparada con la liberada de forma natural; los sismos naturales pueden clasificarse de la siguiente manera:

- Sismos tectónicos: Estos son los ocasionados por la interacción de placas tectónicas. De estos hay dos tipos los interplacas generados por la fricción en las zonas de contacto entre placas y los intraplacas o locales debido a a concentración de fuerzas en una región limitada.
- Sismos volcánicos: Estos ocurren conjunto a erupciones volcánicas, principalmente las ocasiona el fracturación de rocas debido al movimiento de magma, aunque su magnitud sigue siendo menor que los tectónicos. [5]

4.3. Geomorfología de Guatemala

En el territorio guatemalteco la geomorfología está controlada por las interacciones de las placas de Norte América, Caribe y Cocos. Las posiciones de estas son las siguientes: La placa del Caribe está incrustada entre la placa de Norte América y Sudamericana, en el límite oeste tienen un efecto de subducción, y en el este está la placa secundaria de los cocos subduce bajo las demás.

Dada la posición de Guatemala sobre la placa del Caribe y sus límites con la placa de Norte América se genera el sistema de fallas de Polochic-Motagua, dando así las que Guatemala tenga las tres grandes fallas: Polochic, Motagua y Jocotán/Chamelecón.[6]

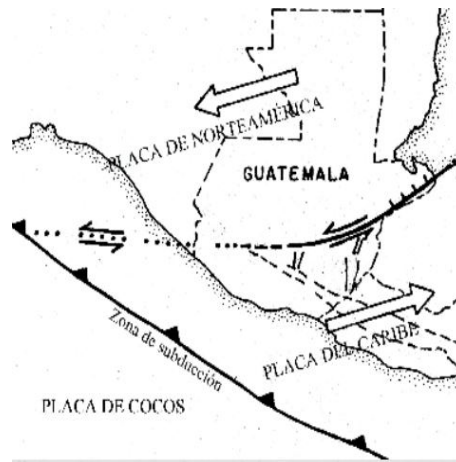


Figura 3: Límites de placas tectónicas en Guatemala.

[7]

4.4. Marco geológico de Guatemala

Guatemala está dividida en dos estructuras la primera que va desde el este-oeste esta compuesto por rocas cristalinas, sedimentarias, paleozoicas y mesozoicas este patrón está desde Chiapas al mar Caribe. El segundo segmento esta que va del noroeste-sureste esta compuesto por rocas volcánicas terciarias recientes, acentuado por una hilera de conos cuaternarios.

En el territorio guatemalteco se pueden distinguir cuatro provincias fisográficas que son:

- Planicie costera del Pacífico: Ubicada en el litoral Pacífico, esta es producida por la erosión de las tierras altas volcánicas y han creado una planicie costera de un ancho promedio de 50 kilómetros.
- Provincia volcánica o cinturón volcánico: Esta zona se caracteriza por sus altas montañas, esta también es llamada cinturón volcánico, atraviesa una gran cantidad de cuencas de la parte occidental, sur y oriental del país.

- Cordillera central de Guatemala: La cordillera central de Guatemala está formada por la faja de rocas plutónicas, metafóricas y sedimentarias plegadas, esta se desarrolla desde Chiapas hasta Honduras.
- Tierras bajas de Petén: esta zona se presenta un bosque tropical húmedo, con elevaciones promedio de 100 metros formada por sedimentos mesozoicos sobre calizas. [8]

4.5. Diseño de estructural.

El proceso de diseño convencional se basa en el cálculo de los elementos que van a conformar la estructura principal con el fin de que esta sea funcional, este proceso es de las primeras etapas del proyecto por lo cual no se deben considerar modificaciones una vez que los cálculos fueron realizados.

El diseño puede ser visto como un proceso que involucra actividades que definan las propiedades del sistema, bajo los conceptos de resistencia y rigidez, ahora se describirán las principales etapas en el proceso de diseño.

4.5.1. Estructuración.

En esta etapa es necesario determinar el sistema o sistemas que de manera global darán resistencia y rigidez capaces de soportar las acciones de las cargas que actuaran sobre dicho sistema, la elección de dicho sistema llevaba acabo junto con la selección de materiales.

4.5.2. Análisis.

Esta etapa es la más importante del diseño ya que es necesario que se evalué la respuesta de la estructura ante las acciones de las cargas, para esto se debe determinar la deformación y como se distribuyen las fuerzas entre cada elemento.

Este resultado numérico se obtiene con ayuda de distintos métodos de cálculo y modelado con programas de computadora especializados, entre estos resultados también están los resultados de las cimentaciones y determinar si el suelo es capaz de soportar.

4.5.3. Dimensionamiento.

Este es un proceso que va de la mano con el análisis, en este lo que se hace es determinar las dimensiones y características de los elementos estructural para que respondan a los resultados del análisis con seguridad, este también es un proceso donde la elección de los elementos tendrá un impacto en la estética general de la estructura por lo cual se busca que sea funcional, además un sobre dimensionamiento o sub dimensionamiento pueden llegar a tener complicaciones en el proceso constructivo y su respuesta a las cargas.

Las fases anteriores llegan a requerir que sea un proceso iterativo ya que el dimensionamiento puede provocar algunos cambios en la arquitectura, o los resultados del análisis indiquen que sea hasta más óptimo el cambio de un sistema por otro, además se debe tomar en cuenta el proceso constructivo y las instalaciones finales que tendrá la estructura. [9]

4.6. Normas de diseño estructural.

En el diseño de estructuras es necesario respaldar los cálculos según las normas o códigos de diseño que proporcionan los requisitos mínimos que deben cumplir dichas obras, estas normalmente vienen de fuentes tero ricas, evidencias experimentales. Cada una de estas dependerá del país y los alcances que ella establezca [10]

4.6.1. AGIES

La Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica (AGIES) es una entidad privada no lucrativa fundada en 1996 esta promueve la investigación y divulgación de conocimientos científicos y tecnológicos en el campo de las estructuras.

La sismología y áreas afines, así como mejoramiento de los docentes y profesionales de este campo. AGIES es la entidad que publica las normas de seguridad estructural aplicables en el territorio guatemalteco algunas de estas son:

- NSE 1 Generalidades administración de las normas y supervisión técnicas.
- NSE 2 Demandas estructurales y condiciones de sitio.
- NSE 2.1 Estudios geotécnicos.
- NSE 3 Diseño estructural de edificaciones.
- NSE 5.1 Presas de tamaño y altura limitados.
- NSE 5.2 Puentes de tamaño y altura limitados.
- NSE 5.3 Obras de retención.
- NSE 6 Evaluación y rehabilitación de obras existentes.
- NSE 7.1 Diseño de concreto reforzado.
- NSE 7.3 Diseño de concreto prefabricado y preesfrozado en edificaciones.
- NSE 7.4 Diseño de mampostería reforzada.
- NSE 7.5 Diseño de estructuras de acero.
- NSE 7.9 Diseño de edificaciones de concreto reforzado con muros de ductilidad baja.
- Manual técnico NSE 7.9 diseño de edificaciones de concreto reforzado con muros.

4.6.2. Asociación Americana de Ingenieros Civiles.

La Asociación Americana de Ingenieros civiles (ASCE por sus siglas en inglés) fue una de las primeras en crear códigos de diseño, en esto se menciona los requisitos mínimos de las obras civiles, estos códigos se han aceptado y aplicado internacionalmente, incluso algunas secciones de los códigos de AGIES contienen referencias directas a los códigos ASCE.

Cabe mencionar que los códigos no contienen todas las posibles situaciones en el diseño de una estructura ya que estos tienen sus propias limitaciones y todo cae en la capacidad y criterio del diseñador. [11]

4.6.3. ASCE 7-16.

Este código es el de cargas mínimas de diseño y criterios asociados para edificios y otras estructuras. Esta proporciona cargas mínimas, niveles de peligro, criterios y objetivos de rendimiento previsto para las estructuras, edificios y competentes no estructurares.

La norma incluye las combinaciones de carga y criterios según los diseños de resistencia o tensión permisibles, especificaciones de materiales estructurales además de los procedimientos de medios alternativos y como comprobar su rendimiento.

Dentro de la norma cabe mencionar los siguientes capítulos:

- Capítulo 17: Requerimientos para el diseño sísmico para estructuras aisladas.
- Capítulo 18: Requerimientos para el diseño de estructuras con sistemas de amortiguación.

Estos capítulos determinan los requisitos mínimos para el diseño de los elementos de aislamiento y amortiguación además de los cálculos y comprobaciones necesarias para que el elemento sea capaz de brindar seguridad y funcionalidad a su estructura.

4.7. Cargas.

Las cargas son todas las sollicitaciones mecánicas, acciones y fenómenos a los cual la estructuraba debe responder para cumplir con la finalidad de su diseño, estas cargas actúan sobre la estructura de forma directa e indirecta y se pueden clasificar de la siguiente manera:

4.7.1. Cargas muertas.

Estas se comprenden de todos los elementos permanentes de una construcción, sin necesidad de ser elementos estructurales, estos pueden ser el peso propio de la estructura, pisos, rellenos, cielos, vidrieras, tabiques así como equipos fijos, así como casos específicos según el código de diseño.

4.7.2. Cargas vivas.

Estas cargas son producidas por el uso y ocupación de la estructuras así como ciertos materiales y equipos no fijos utilizados para el mantenimiento de la misma. Las cargas vivas se especifican según su localización en la estructura, así como su uso, y nivel de ocupación todo este dependerá del uso final de la estructura. [12]

4.7.3. Viento.

Este tipo de carga externa a la estructura se genera por la energía cinética de una masa de aire en movimiento, la estructura como sus componentes debe ser capaz de soportar el deslizamiento, levantamiento o el volteo por la presión ejercida por la acción del viento.

El viento es capaz de ejercer presiones positivas y negativas dependiendo de la zona en que esta golpea, las presiones negativas son conocidas como succión y las positivas de presión, la presión del viento y sus efectos dependerán de la ubicación de la estructura y los estudios de velocidad de viento de las normas correspondientes. [13]

4.7.4. Cargas de ceniza.

Este tipo de carga es generado por la acumulación de dicho material sobre una cubierta, mientras mayor sea el espesor más presión ejercerá sobre la estructura, por lo cual es necesario tomarlo en cuenta al momento de realizar el diseño de una obra civil, el equivalente a esta carga es la nieve y el efecto de agua de lluvia acumulada llega a tener un efecto similar sobre las cubiertas. [14]

4.8. El sismo y sus efectos sobre las estructuras.

Hay muchos factores que afectan al impacto de un sismo sobre las estructuras, en primero la aceleración que el sismo provoque sobre la estructura esto dependerá de la magnitud, la intensidad y la duración este, así como la dirección. El segundo factor es el suelo este como base que sostiene a la estructura y este es capaz de ofrecer una respuesta ante la acción sufrida.

Por último está la respuesta de la estructura, este dependerá de muchos factores como lo son la rigidez, la configuración estructural, configuración en planta, elevación entre otros, por esto un diseño deficiente puede llevar a la falla completa de la estructura. Para evitar esto las normas y códigos de diseño tienen sus criterios para la consideración de fuerzas sísmicas y los datos pertinentes para los cálculos correspondientes. [15]

4.9. Aspectos sísmicos considerados en la NSE-2 capítulo 4.

En esta sección del código establece los requisitos de nivel de protección sísmica para el territorio guatemalteco en sus distintas localidades, así mismo se establecen los parámetros y espectros sísmicos que serán utilizados para el diseño de la estructura.

4.9.1. Sismicidad y nivel de protección.

- El índice de sismicidad es un valor que califica la amenaza sísmica en las distintas macro zonas del país.
- El Nivel de Protección Sísmica (NPS) es necesario para alcanzar los objetivos de la norma y este depende de la clasificación de la obra y del índice de sismicidad.

Índice de Sismicidad ^[b]	Clase de obra ^[a]			
	Esencial	Importante	Ordinaria	Utilitaria
$I_o = 4$	E	D	D	C
$I_o = 3$	D	C	C	B
$I_o = 2$	C	B	B	A
Probabilidad de exceder el sismo de diseño ^[c]	5% en 50 años ^[d]	5% en 50 años ^[d]	10% en 50 años	Sismo mínimo ^[e]

Figura 4: Nivel de Protección Sísmica y probabilidad del sismo de diseño del código NSE 2.

4.9.2. Clasificación de sitio.

Esta sección se clasifica según las características del perfil del suelo que soportarán los cimientos las clasificaciones son AB, C, D, E o F. Este valor tendrá un impacto directo en el espectro de diseño.

4.9.3. Sismos para diseño estructural

Esta sección del código establece varios niveles de protección sísmica estos se definen por medio de espectros de respuesta sísmica simplificados estos se distinguen de la siguiente manera:

- Sismo básico: Estos son los que tienen un 10 % de probabilidad nominal de ser excedido en un periodo de 50 años, este se usa para el diseño de obras clasificadas como obras ordinarias o donde las normas lo permitan.
- Sismo severo: Este sismo tiene una probabilidad del 5% nominal de ser excedido en un periodo de 50 años, estos se deben utilizar en obras de clasificación importante o esencial o donde lo indiquen las normas, además si el desarrollador del proyecto lo requiere se puede utilizar un sismo severo para una obra ordinaria.

- Sismo extremo: Este tiene un 2% de probabilidad nominal de ser excedido en un periodo de 50 años este dependerá de zonificación sismo de la Figura 4.
- Sismo mínimo: Este es una reducción del sismo básico que permite únicamente en los casos de excepción determinados en la normas de diseño y también en algunos casos en la rehabilitación de obras existentes.

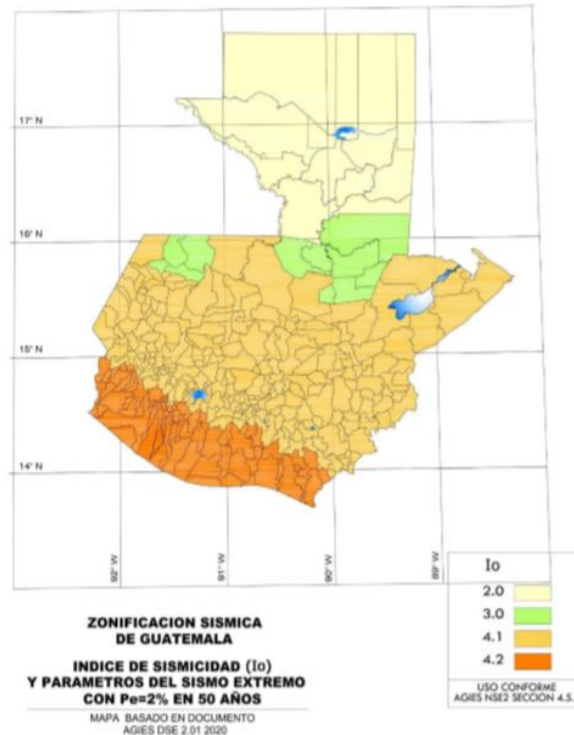


Figura 5: Mapa de zonificación sísmica de Guatemala del código NSE 2.

4.9.4. Espectros genéricos para diseño.

- Parámetros básicos: Este es un valor numérico que representa la ordenada espectral de periodo corto y la ordenada espectral con periodo de 1 segundo del sismo extremo considerado en el basamento de roca en el sitio de interés. estos valores están listados y especificados para el territorio guatemalteco como se puede ver en la Figura 4.
- Ajustes por clase de sitio: Esta sección del código establece que los factores básicos deben ser ajustados según la sección lo establezca.
- Ajustes por intensidades sísmicas especiales: En algunos casos los valores de las ordenas espectrales deberán ser ajustadas por la posibilidad de intensidades incrementadas de vibración en el sitio esto se debe a la proximidad sobre fallas activas dentro del territorio nacional, el código establece los criterios de proximidad para aplicar estos valores.
- Periodos de vibración de transición: Este sirve para construir los espectros de diseño según los periodos específicos.

- Probabilidad nominal de ocurrencia de los sismos de diseño: Este valor determina la probabilidad de que un sismo ocurra según el nivel de protección que se requiere, este valor reducirá las ordenadas según el nivel de protección.[12]

4.9.5. Tipos de sismo.

Los sismos para el análisis se pueden clasificar de la siguiente manera:

- Sismo básico de operación (OBE): Este se considera como el sismo mínimo de diseño según la norma NSE 2
- Sismo máximo creíble (MCE): El máximo sismo que parece capaz de ocurrir en el sitio del proyecto bajo condiciones tectónicas conocidas.
- Sismo máximo de diseño (MDE): Este será el caso máximo de diseño al cual puede estar diseñada una estructura en dado caso puede llegar a ser igual al MCE. [16]

4.10. Acero como material estructural.

Se define como acero estructural al producto de la aleación de hierro, carbono y pequeñas cantidades de otros como silicio, fósforo, azufre y oxígeno, estos últimos tienen ligeras variaciones según las normas y los países donde este es fabricado y comercializado, este material se consigue a través de procesos industriales lo cual hace que exista una gran variedad de aceros con diferentes calidades, formas y especificaciones.

Esto implica que los distintos aceros tienen restricciones y usos en las normas ya que todas sus propiedades mecánicas serán tomadas en cuenta para el diseño de las estructuras.

4.10.1. Acero ASTM.

La Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (ASTM) por sus siglas en inglés es una organización que realiza normas internacionales y estándares para estos, estas normas son reconocidas y utilizadas internacionalmente. Estas entre sus contenidos tienen las composiciones químicas del material, las propiedades mecánicas, estas no solo incluyen acero.[17]

4.10.2. Acero ASTM A992.

Esta designación de las normas ASTM habla sobre aceros estructurales en Estados Unidos, son los más comunes para la construcción de edificios con las distintas presentaciones de los perfiles y sus tipos, este acero es un A572 de grado 50.

Propiedades mecánicas del acero A992

- El esfuerzo de fluencia mínima debe ser de 50 ksi.

- El límite superior de F_y es de 65 ksi.
- El carbono equivalente no excede de 0.5 y la relación F_y/F_u no es mayor del 0.85.
- Características favorables para ser soldado y propiedades dúctiles. [18]

4.10.3. Acero A572

Este es un acero de alta resistencia y baja aleación que se emplea en placas para ensamblar elementos reduciendo así su peso.

Propiedades del acero A572 grado 50.

- Tensión: 65 ksi como mínimo.
- Fluencia: 50 ksi como mínimo.
- Elongación: 16 % en 8", 19 % mínimo en 2"[19]

4.10.4. Tipos de perfiles.

Normalmente los perfiles de acero pueden clasificarse según el tipo de proceso de producción estos son algunos de los perfiles de acero más comunes y comerciales:

- Perfiles W: Los perfiles W representan una gama de perfiles conformados por el alma que es la parte central y las dos aletas o bridas en las partes superior e inferior.
- Perfiles C: Estos son perfiles fabricados en caliente utilizando láminas para que tenga dicha forma, estos son comúnmente usados para vigas, viguetas y canales.
- Angulares en L: Este perfil de acero es fabricado en forma equidistante en la sección transversal, el ángulo recto resultante se emplea principalmente en techos industriales.
- Perfiles T: Este perfil se fabrica en caliente de la unión de láminas y es usado para torres de transmisión. [20]

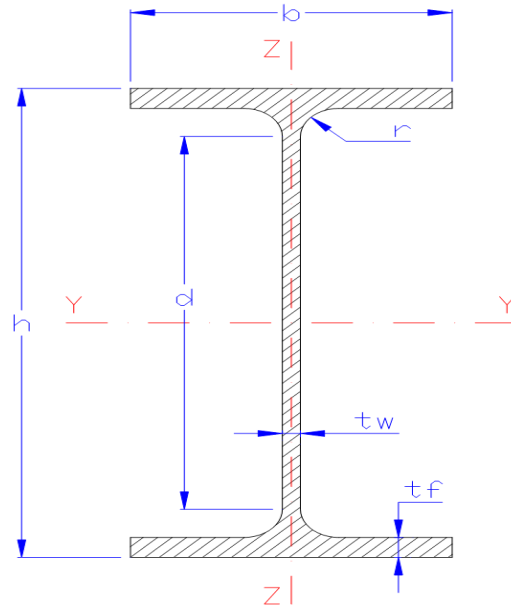


Figura 6: Sección transversal de perfil W [21]

4.11. Sistemas de un grado de libertad.

Las edificaciones con sistemas de aislamiento de base permite establecer que el edificio se comportaran como estructuras rígidas y los desplazamientos máximos se concentran en los aisladores, esto permite un diseño preliminar eficiente y realizar las integraciones correspondiente. [22]

4.12. Sistemas de control estructural.

Estos sistemas son métodos alternos para disminuir las solicitaciones de la una estructura, mejorando sus propiedades dinámicas con base a los siguientes sistemas de control:

- Control pasivo.
- Control activo.
- Control semi activo.
- Control híbrido.

4.12.1. Control pasivo.

Estos sistemas están enfocados en dispositivos de respuesta ante el movimiento de la base y así disipar la energía vibratoria. Estos sistemas normalmente incluyen aisladores de

base, amortiguadores visco escolásticos y amortiguadores de masa.

Aislamiento de la base

Este tipo de control se logra al colocar algún tipo de capa flexible entre la estructura y la cimentación, lo que aumenta el periodo fundamental de la estructura y lo aleja de los periodos predominantes del suelo. De estos el uso más común es de los cojinetes elastómeros en edificios de baja y mediana altura.

4.12.2. Control activo.

Estos sistemas se utilizan para atenuar la respuesta de la estructura sometidas a excitaciones internas o externas, tales como maquinaria, tráfico, sismos y viento, el sistema fundamentalmente funciona con actuadores que imparten una fuerza o movimiento a la estructura en dirección opuesta al movimiento.

Esta respuesta depende de la medición de la respuesta dinámica de la estructura y suelen ser como tendones, tirantes y sistemas de masa activos que emplean acción hidráulica, neumática o electromagnética.

Para este sistema se debe tomar en cuenta una estructura ideal y la existencia de una fuente externa de alimentación para su funcionamiento, por lo tanto son vulnerables a variaciones al flujo eléctrico.

4.12.3. Control semi activo.

Este sistema nace de los sistemas activos buscando reducir su dependencia de una fuente de energía estos operan con una batería, buscando eliminar la amenaza de la falta de energía durante un evento sísmico.

Un dispositivo de control de este tipo no puede aumentar la energía mecánica en el sistema pero puede usarse para reducir el impacto. Algunos ejemplos de estos son dispositivos líquidos controlables, y dispositivos de fricción.

4.12.4. Control híbrido.

Este sistema consiste en las combinaciones de dos o más dispositivos de control ya sean activos, pasivos o semi activos. Debido a que hay múltiples dispositivos funcionando simultáneamente, este sistema puede aliviar algunas de las restricciones y limitaciones que existen cuando solo uno de los sistemas es aplicado.

Aunque estos sistemas son más fiables que un sistema totalmente activo resulta ser mucho más complejo comúnmente se ve aplicado en sistemas de amortiguadores de masa.[23]

4.13. Disipadores fluidos viscosos.

La filosofía tradicional del diseño sísmico está enfocada en que las estructuras deben soportar las cargas laterales generadas por los efectos de los sismos o por las cargas de viento solo por su acción elástica, esta puede sufrir daños pero se debe evitar el colapso en preservando la vida humana, esta filosofía es aceptable para cubrir las necesidades de seguridad y economía.

Las nuevas tendencias de diseño han desarrollado los controles pasivos esta nueva filosofía de diseño promueve el uso de sistemas de aislamiento sísmico y disipadores de energía. Los sistemas son los siguientes:

- Sistemas de amortiguadores de fricción.
- Amortiguadores metálicos.
- Amortiguadores viscoelásticos.
- Amortiguadores fluidos viscosos.

4.13.1. Amortiguadores fluidos viscoso.

Los amortiguadores viscosos permiten disipar la energía del sismo por medio de un pistón y un fluido viscoso transformando la energía cinética en energía calórica, al ser este el que absorbe la energía cinética la estructura principal sufre menos daño y menores derivas. Este sistema responde a la ecuación de energía de Uang y Bertero que se puede ver en la siguiente figura. [24]

$$E_I = E_k + E_s + E_h + E_d$$

Figura 7: Ecuación de energía absoluta de Uang y Bertero [25]

Donde:

- E_I : Representa la energía del sismo.
- E_k : Representa la energía cinética.
- E_s : Representa la energía de tensión elástica.
- E_h : Es la energía histeria irre recuperable.
- E_d : Es la energía disipada por los amortiguadores viscosos suplementarios.

4.13.2. Propiedades mecánicas de los amortiguadores.

Los amortiguadores viscosos comúnmente son pistones de acero inoxidable con una cabeza con orificios y están llenos de líquido. Este líquido suele ser aceite de silicio. En un extremo del pistón se tiene un acumulador mientras que del otro está la varilla. La diferencia de presiones entre los extremos da como resultados la fuerza de amortiguación.

La constante de amortiguación es variable y esta se puede configurar con los orificios de la cabeza del pistón, para obtener un comportamiento viscoso puro la velocidad y la fuerza del amortiguador deben estar en fase, sin embargo hay otras configuraciones como una que depende de la fuerza de restauración en lugar de la velocidad se puede lograr al cambiar la cantidad de fluido almacenado mientras el pistón comience a moverse.[24]

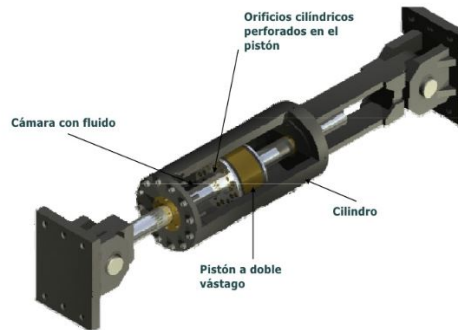


Figura 8: Pistón de disipación de fluido viscoso.
[26]

4.13.3. Comportamiento de la fuerza del amortiguador.

La fuerza de salida se puede expresar con la siguiente ecuación:

$$F_d = C |\dot{u}|^\alpha \sin(\dot{u}) \quad (1)$$

Donde C es la constante de amortiguamiento, \dot{u} es la velocidad relativa entre los dos extremos del amortiguador, α es un valor que oscila entre 0 y 1, este valor si es 1 es denominado amortiguador lineal mientras que si el valor es menor a 1 es denominado amortiguador no lineal este último es sumamente efectivo minimizando los efectos de las altas velocidades.

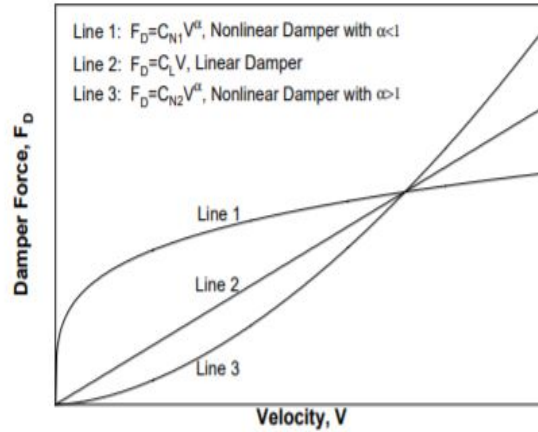


Figura 9: Relación entre fuerza y velocidad en los tipos de disipadores viscosos [24]

4.13.4. Ciclo de histéresis.

El ciclo de histéresis es una gráfica que muestra las relaciones de resistencia-deformación, en la figura 10(a) muestra el comportamiento viscoso lineal puro, este tiene forma de una eclipse perfecta esta puede representar la estructura completa siempre y cuando no exista rigidez de almacenamiento lo cual facilita el diseño de los elementos viscosos suplementarios.

Sin embargo, si el amortiguador desarrolla una fuerza de restauración el bucle cambia como se muestra en la Figura 10(b) convirtiéndose en un comportamiento visco-elástico.

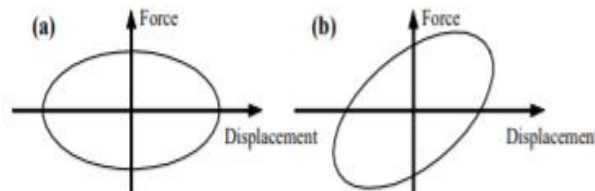


Figura 10: Bucles de histéresis de amortiguadores con comportamiento viscos puro y visco-elástico [24]

4.13.5. Relación de amortiguamiento de estructuras con los amortiguadores viscosos.

Para las siguientes consideraciones del sistema tiene un solo grado de libertad con un amortiguador viscoso lineal bajo una historia de tiempo de desplazamiento sinusoidal impuesto por:

$$u = u_o \sin(\omega t) \quad (2)$$

En esta u es el desplazamiento del sistema y el amortiguado, u_o es la amplitud del desplazamiento, ω es la frecuencia de la vibración. la forma de medir la fuerza de respuesta

es:

$$P = P_o \sin(\omega t + \sigma) \quad (3)$$

En la ecuación 3 se tiene que P es la fuerza de respuesta del sistema, P_o es la fuerza de amplitud, σ es el ángulo de fase. La ecuación que describe la energía disipada por los amortiguadores es:

$$W_D = \oint F_D du \quad (4)$$

Donde F_D es la fuerza del amortiguador equivalente $C\dot{u}$, C es el coeficiente de amortiguamiento y u es la velocidad del sistema por lo tanto se puede deducir la siguiente ecuación:

$$W_D = \oint C\dot{u} du = \int_0^{2\pi/\omega} C\dot{u} dt = C_0^2 \omega^2 \int_0^{2\pi} \cos^2(\omega t) d(\omega t) = \pi C u_0^2 \omega \quad (5)$$

La relación de amortiguación aportada por el amortiguador se puede expresar como $\varepsilon_d = C/C_{cr}$ con esto se obtiene la siguiente ecuación:

$$W_D = \pi C u_0^2 \omega = \pi \varepsilon_d C_{cr} u_0^2 \omega = 2\pi \varepsilon_d \sqrt{Km} u_0^2 \omega = 2\pi \varepsilon_d K u_0^2 \frac{\omega}{\omega_0} = 2\pi \varepsilon_d W_s \frac{\omega}{\omega_0} \quad (6)$$

Donde:

- C_{cr} : Coeficiente crítico de amortiguación.
- K : Rigidez.
- M : Masa.
- ω_0 : Frecuencia de natural.
- w : Energía de deformación elástica del sistema.

En esta ecuación las variables C_{cr} , K, m, ω_0 y W son respectivamente el coeficiente crítico de amortiguación, masa, frecuencia de la naturaleza y energía de deformación elástica del sistema. La relación de amortiguamiento atribuida al amortiguador puede expresarse como:

$$\varepsilon_d = \frac{W_d}{2\pi W_s} \frac{\omega_0}{\omega} \quad (7)$$

Durante el sismo ω es fundamentalmente igual a ω_0 por lo cual la la ecuación (7) se puede escribir de la siguiente manera:

$$\varepsilon_d = \frac{W_d}{2\pi W_s} \quad (8)$$

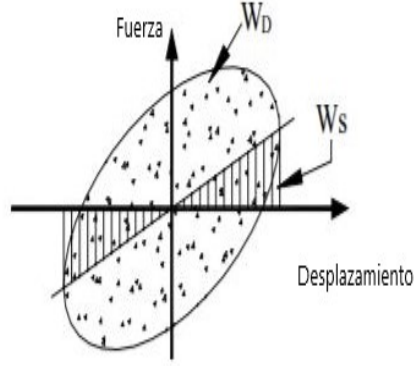


Figura 11: Disipación de energía W_d en un ciclo de movimiento armónico y deformación W_s .
[24]

4.13.6. Relación de estructuras con amortiguadores viscosos no lineales

Considerando el sistema como uno de un grado de libertad (SDOF por sus siglas en inglés) y un amortiguador viscoso del tipo no lineal se pueden describir la velocidad del sistema de la siguiente forma:

$$\dot{u} = \omega u_0 \sin(\omega t) \quad (9)$$

Utilizando la ecuación (1) y la ecuación (9) e introducirla en la ecuación (4) se tendrá la nueva ecuación de disipación de energía del amortiguador no lineal de un ciclo de movimiento sinusoidal:

$$W_D = \oint F_D du = \int_0^{2\pi/\omega} F_D \dot{u} dt = \int_0^{2\pi/\omega} |C \dot{u}^{1+\alpha}| dt = C(\omega u_0)^{1+\alpha} \int_0^{2\pi/\omega} |\sin^{1+\alpha} \omega t| dt \quad (10)$$

si $\omega t = 2\theta$ y $dt = \frac{2}{\omega} d\theta$ la ecuación 10 puede reescribirse de la siguiente manera:

$$W_D = C(\omega u_0)^{1+\alpha} \frac{2}{\omega} \int_0^\pi |\sin^{1+\alpha} 2\theta| d\theta \quad (11)$$

$$= 2^{2+\alpha} C \omega^\alpha u_0^{1+\alpha} \int_0^{\pi/2} 2 \sin^{1+\alpha} \theta \cos^{1+\alpha} \theta d\theta \quad (12)$$

$$= 2^{2+\alpha} C \omega^\alpha u_0^{1+\alpha} \frac{\gamma^2(1+\alpha/2)}{\gamma(2+\alpha)} \quad (13)$$

En la ecuación (13) γ representa la función Gamma. Al igual que con los amortiguadores viscosos lineales hay una relación equivalente para los no lineales que dan la siguiente ecuación:

$$\lambda = 2^{2+\alpha} \frac{\gamma^2(1 + \alpha/2)}{\gamma(2 + \alpha)} \quad (14)$$

Para representar la relación de amortiguación efectiva de todo el sistema y la relación con los amortiguadores viscosos no lineales agregados se deriva de la siguiente ecuación de deformación elástica:

$$W_k = \omega^2 \sum_i m_i u_i^2 \quad (15)$$

Suponiendo que todos los amortiguadores tienen las mismas características y el mismo valor α , además utilizando las ecuaciones (15), (14), (13) se puede determinar la relación de amortiguamiento que aporta el sistema:

$$\varepsilon_d = \frac{\sum_i \lambda C_j u_{rj}^{1+\alpha} \cos^{1+\alpha} \theta_j}{2\pi\omega^{2-\alpha} \sum_i m_i u_i^2} \quad (16)$$

Donde r_j es un el desplazamiento relativo entre los extremos del amortiguador mientras que j es el desplazamiento relativo entre la dirección horizontal y se puede expresar de la siguiente manera

$$u_i = A\phi_i \quad (17)$$

En la ecuación (17) la variable ϕ_i representa el primer desplazamiento modal de i -ésimo grado de de libertad mientras que A es la amplitud, finalmente se puede establecer la relación efectiva de la estructura con los amortiguadores no lineales.

$$\varepsilon_{eff} = \varepsilon_o + \frac{\sum_j \lambda C_j \phi_{rj}^{1+\alpha} \cos^{1+\alpha} \theta}{2\pi A^{1-\alpha} \omega^{2-\alpha} \sum_i m_1 \phi_i^2} \quad (18)$$

4.13.7. Configuraciones de soportes de apoyo.

La posición y configuración de cada soporte no solo se adapta para temas estéticos si no que estos pueden aplicar el desplazamientos entre pisos, ya que cada configuraciones tendrá sus propias constantes que están asociados con factores de aumento mayores que la unidad siendo esto conveniente para maximizar la disipación de energía del sistema.

Algunas configuraciones son:

- Abrazadera de placa superior.
- Abrazadera de palanca inferior.
- Abrazadera K Chevron.
- Diagonal.

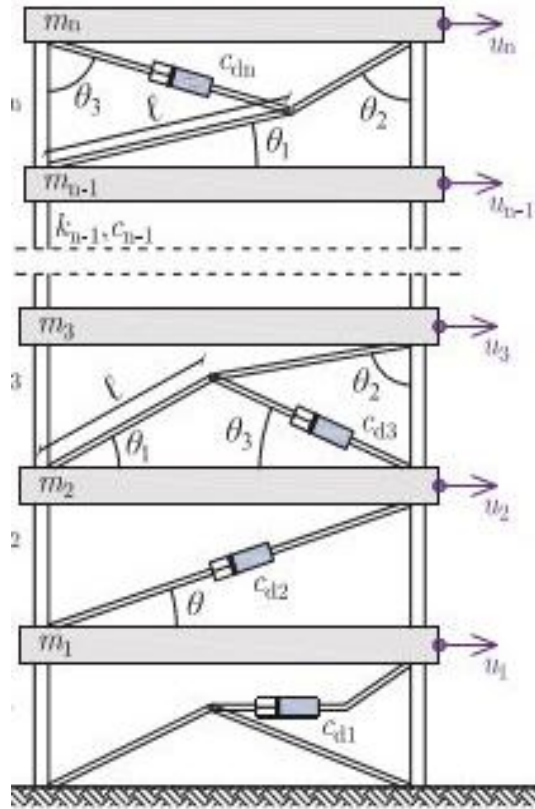


Figura 12: Estructura n pisos con sistemas de amortiguadores con diferentes configuraciones. [27]

Estas son solo algunas de las posibles configuraciones y las ecuaciones de movimiento y los coeficientes de amortiguamiento de de las configuraciones están dadas por las siguientes ecuaciones:

Coefficiente de amortiguamiento del sistema de abrazadera de placa superior.

$$f_n = \sin\theta_3 + \frac{\sin\theta_2 * \cos\theta(\theta_3 - \theta_1)}{\cos(\theta_1 + \theta_2)} \quad (19)$$

Coefficiente de amortiguamiento del sistema de abrazadera de placa inferior.

$$f_3 = \frac{\sin\theta_2 * \sin\theta(\theta_1 + \theta_3)}{\cos(\theta_1 + \theta_2)} \quad (20)$$

Coefficiente de amortiguamiento del sistema de abrazadera K Chevron.

$$f_1 = 1.0 \quad (21)$$

Coefficiente de amortiguamiento del sistema diagonal.

$$f_2 = \cos\theta \quad (22)$$

4.14. Análisis de tiempo historia

El análisis de tiempo historia permite estudiar la respuesta dinámica de la estructura en cada adición de tiempo, este método resulta hasta cierto punto más confiable que un análisis estático más cuando las estructuras tiende a tener efectos de torsión debido a asimétricas arquitectónicas o marcos no ortogonales.

En el método dinámico lineal las estructuras se modelan con un grado de libertad con un sistema de matriz de rigidez elástica lineal y una matriz de amortiguación viscosa equivalente. Cuando se utiliza el análisis de historia tiempo los desplazamientos y las fuerzas internas se encuentran con el análisis elástico, teniendo en cuenta los modos superiores.

En este método respuesta se calcula en el dominio del tiempo y así conservar toda la información de fase, el resultado analítico de la ecuación de movimiento para un sistema de un grado de libertad es normalmente no es concebible si la fuerza externa o la aceleración del suelo cambia aleatoriamente con el tiempo. [28]

4.14.1. Registros de movimiento de la Tierra.

El movimiento del suelo tiene características dinámicas que son:

- Desplazamiento máximo del suelo.
- Velocidad máxima del suelo.
- Aceleración máxima del suelo.
- Frecuencia y duración.

Estas características son las que juegan un papel predominante en el estudio del comportamiento de las estructuras bajo cargas sísmicas, basado en el contenido de del espectro es decir su frecuencia y duración de los registros se pueden clasificar en tres tipos:

- Alta frecuencia.

- Frecuencia intermedia.
- Baja frecuencia.

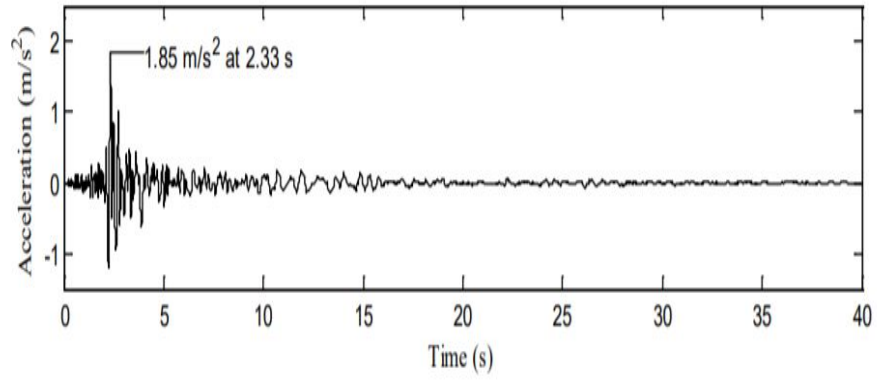


Figura 13: Aceleración del suelo con registros de Coalinga del año 1983 [28]

5.1. Tipología de la estructura.

Para el diseño de los disipadores se establecerá una estructura de 6 pisos, con 8 ejes en dirección X y 6 ejes en dirección Y con 7 metros de separación entre cada eje teniendo un total de 1715 metros cuadrados por nivel y una altura típica de 3.6 metros.

Para los elementos estructurales se utilizaron perfiles W de acero A992. Mientras que la losa de concreto de 4000psi de un grosor de dieciséis centímetros. Estos son solo elementos preliminares basados en una estimación y serán comprobados en el proceso de análisis posterior.

5.2. Cargas

5.2.1. Cargas vivas

Dicha estructura cumplirá con un uso de vivienda ubicada en el centro de la ciudad de Guatemala.

Por lo cual según la NSE-2 en la sección 3.7.1 se utilizara una carga de 200 kg/m^2 y una cubierta sin acceso para lo cual se usara una carga de 100 kg/m^2

5.2.2. Cargas muertas

Para las cargas muertas de la estructura se toma en cuenta el peso mismo de cada elemento estructural, pisos y muros tabiques, todos estos valores extraídos de la norma NSE-2 en la sección 2.4.3 y del anexo B tabla B-1

3.7 — Cargas vivas para edificaciones

3.7.1 Las cargas vivas para edificaciones, de acuerdo a su tipo de ocupación o uso, se indican en la Tabla 3.7.1:

Tabla 3.7.1 — Cargas vivas para edificaciones

Tipo de ocupación o uso	Wv (kg/m ²)	Pv (kg)
Vivienda		
Balcones	300 [R]	
Habitaciones y pasillos	200 [R]	
Escaleras	300	
Oficina		
Pasillos y escaleras	300	
Oficinas	250 [R]	800
Áreas de cafetería	500	
Hospitales		
Pasillos y rampas	500	450
Clínicas y encamamiento	250 [R]	
Servicios médicos y laboratorio	350 [R]	800
Farmacia	500	
Escaleras	500	
Cafetería y cocina	500	

Figura 14: Tabla de cargas vivas para edificaciones [12]

Todas estas cargas serán necesarias para asignarlas, más adelante, en el modelo y aplicar las combinaciones de carga según lo estipula el código de diseño NSE-2, en el capítulo 8.

5.3. Aspectos sísmicos

En esta sección se establecen parámetros que son resultados de estudios de suelo, debido a que esta estructura no se basa en una estructura real, se establecerán estos parámetros y la ubicación de esta para poder realizar el análisis sísmico.

5.3.1. Sismo para diseño estructural.

Según la NSE-2 es necesario clasificar la obra según su importancia y el índice de sismicidad, luego la probabilidad de ocurrencia todo esto con ayuda de la tabla 4.2.2. Como resultado para esta estructura tendremos los siguientes parámetros:

Cuadro 1: Parámetros de diseño sísmico.

Índice de sismicidad	4.2
Clase de obra	D
Probabilidad de exceder el sismo de diseño	5 % en 50 años
Ubicación	Ciudad de Guatemala

5.3.2. Ajuste por clase de sitio.

Este cálculo se hará según lo especificado en la sección 4.5.1 del NSE-2 y estar en función de las siguientes ecuaciones:

$$S_{cs} = S_{cr} * F_a \quad (23)$$

$$S_{1s} = S_{1r} * F_v \quad (24)$$

Donde:

- S_{cs} : es la ordenada espectral del sismo extremo en el sitio de interés para un periodo de vibración corto.
- S_{1s} : Es la ordenada espectral correspondiente a periodos de vibración de 1 segundo; ambos para un amortiguamiento nominal de 5 % del crítico.
- F_a : Es el coeficiente de sitio para periodos de vibración cortos y se obtiene de la Tabla 4.5.1 del NSE-2.
- F_v : Es el coeficiente de sitio para periodos largos y se obtiene de la Tabla 4.5.2 del NSE-2.

Cuadro 2: Valores por ajustes de sitio para la estructura.

F_a	1.0
F_v	1.0
S_{cr}	1.43 g
S_{1r}	0.88 g

5.3.3. Ajustes por intensidades sísmicas especiales.

En algunos casos será necesario hacer un ajuste adicional debido a la posibilidad de intensidades incrementadas de vibración, estas están señaladas en la sección 4.7 de la NSE-2 y las ecuaciones serán las siguientes:

$$S_{cs} = S_{cr} * F_a * N_a \quad (25)$$

$$S1s = S1r * Fv * Nv \quad (26)$$

Donde:

- Na y Nv: son factores que se aplican por la proximidad de las amenazas especiales indicas en la sección 4.6 del NSE-2.

Para este caso se establece que la estructura no estará cerca de fallas activas por lo cual los factores serán los siguientes:

Cuadro 3: Factores para periodos cortos y largos utilizados.

Na	1.0
Nv	1.0

Luego de aplicar la ecuación 25 y la 26 obtenemos los siguientes valores correspondientes a los parámetros del espectro sísmico:

Cuadro 4: Valores de las ordenadas espectrales.

Scs	1.43 g
S1s	0.88 g

5.3.4. Periodo de vibración de transición.

Para construir un espectro de diseño es necesario definir los periodos de vibración en función de

- Periodo Ts: este separa el periodo corte del periodo largo y está en función de la siguiente ecuación:

$$Ts = S1s / Scs \quad (27)$$

- Periodo To: este define el inicio de la meseta de periodos cortos del espectro y está en función de la siguiente ecuación:

$$To = 0.2 * Ts \quad (28)$$

5.3.5. Probabilidad nominal de ocurrencia de los sismos de diseño

Este parámetro determina la posibilidad de ocurrencia de un sismo de diseño la NSE-2 en la sección 4.5.5.a nos da los valores de acuerdo a nivel de protección sísmica y la probabilidad de ocurrencia del mismo.

Cuadro 5: Factores Kd de acuerdo al nivel de sismo

Nivel de sismo	Factor Kd
Sismo ordinario 10 % de probabilidad en 50 años	0.66
Sismo severo 5 % de probabilidad en 50 años	0.80
Sismo extremo 2 % de probabilidad en 50 años	1.00
Sismo mínimo	0.55

5.3.6. Calibración de los parámetros sísmicos.

Una vez establecido el valor de Kd sera necesario calibrar los parámetros anteriores según las siguientes ecuaciones:

$$Scd = Kd * Scs \quad (29)$$

$$S1d = Kd * S1s \quad (30)$$

Para esta estructura con los parámetros establecidos anteriormente se puede establecer un Kd=0.80 para poder aplicar las ecuaciones 29 y 30 dando los siguientes resultados:

Cuadro 6: Valores calibrados del espectro sísmico.

Scd	1.144
S1d	0.704

5.3.7. Espectros genéricos probables.

Para generar un espectro de diseño es necesario generar la función Sa(T) para cualquier periodo de vibración T, están dados por las siguientes ecuaciones:

$$Sa(T) = Scd \left[0.4 + 0.6 \frac{T}{To} \right] : \text{Cuando } : T < To \quad (31)$$

$$Sa(T) = Scd : \text{Cuando } : To \leq T \leq Ts \quad (32)$$

$$Sa(T) = \frac{S1d}{T} \leq Scd : \text{Cuando } : Ts < T < TL \quad (33)$$

$$Sa(T) = \frac{S1d}{T^2} * TL : \text{Cuando } : T \geq TL \quad (34)$$

5.3.8. Componente vertical del sismo de diseño.

La componente vertical está dada por la siguiente ecuación:

$$Svd = 0.20 * Scd \quad (35)$$

5.3.9. Aceleración máxima del suelo (AMS)

La aceleración máxima del suelo correspondiente al sismo de diseño se calculará con la siguiente ecuación:

$$S_{vd} = 0.40 * S_{cd} \quad (36)$$

5.3.10. Espectros sísmicos.

Con los valores, parámetros y modificadores anteriores se obtienen los siguientes espectros de diseño en función de las ecuaciones 31,32,33,34.

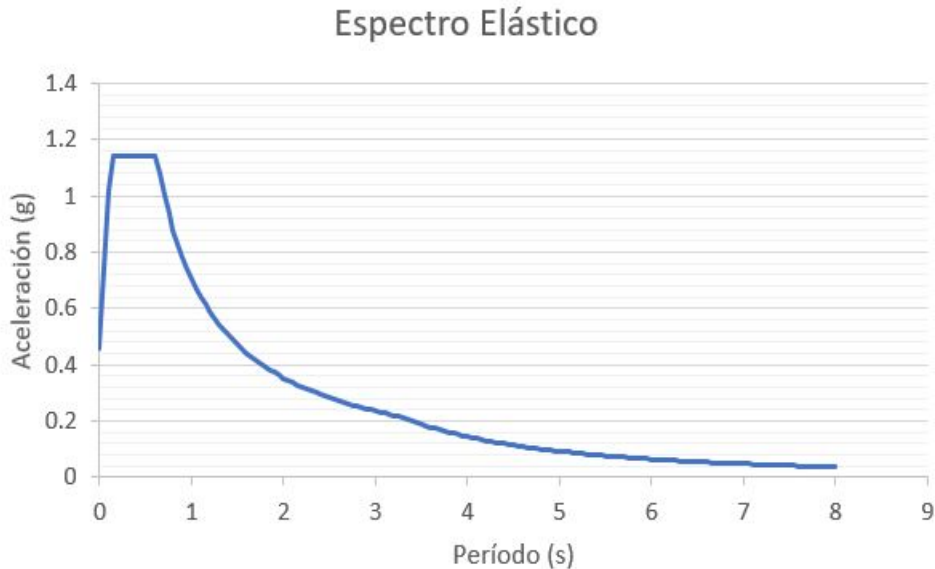


Figura 15: Espectro elástico.
[12]

5.4. Modelado de la estructura en ETABS.

5.4.1. Modelado de los elementos principales.

Este proceso de modelado se hará en el programa ETABS en su versión 18.1.1, en esta estableceremos las unidades de mediciones, así como los códigos de diseño del acero y el concreto, en esta se utiliza el sistema métrico y los códigos de diseño AISC.

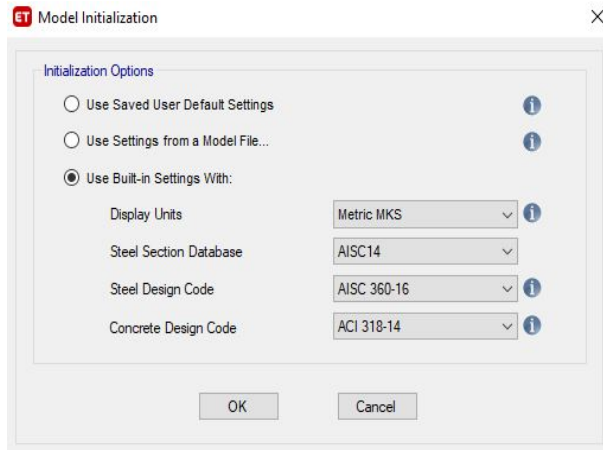


Figura 16: Opciones para el inicio del modelado.

En esta ventana podremos generar distintas opciones de grillas, en este se utiliza la opción de solo la grilla, además aquí pondremos la cantidad de ejes en ambos sentidos y la cantidad de pisos como su elevación.

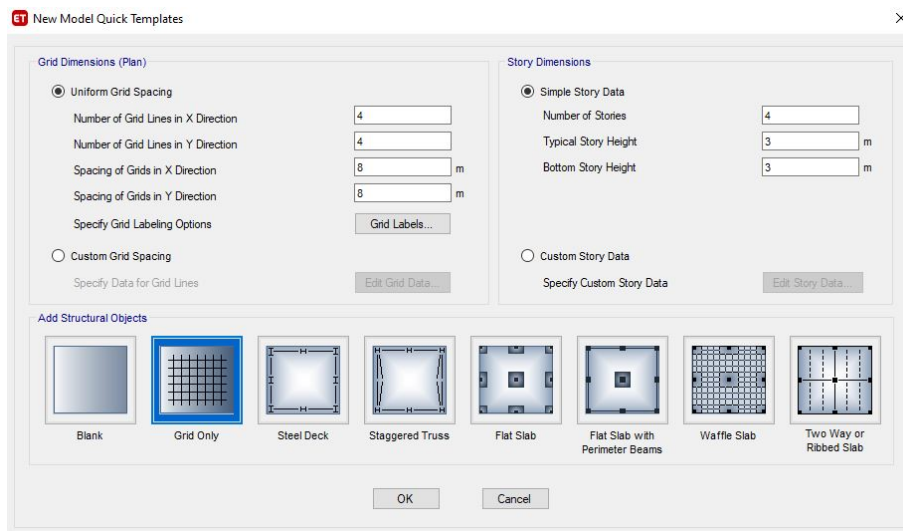


Figura 17: Configuración de ejes y pisos.

5.4.2. Definición de elementos columnas y vigas.

Utilizando la ventana de definición entrando a propiedades de la sección y frame sections se puede cargar las propiedades de los perfiles seleccionados anteriormente para el diseño así como las propiedades específicas de su material.

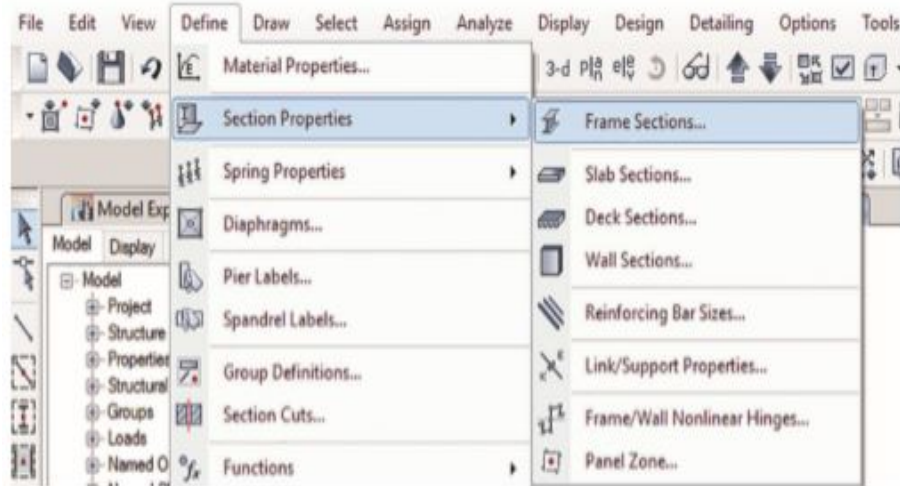


Figura 18: Menú de definición de secciones.

En la ventana de propiedades importaremos los perfiles deseados, en se busca los perfiles W, para este modelo en específico se utilizaron perfiles como lo son: W18x35, W18x40, W18x60.

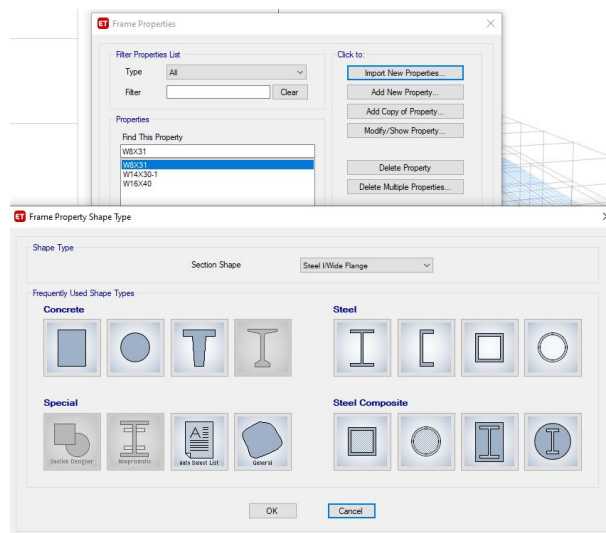


Figura 19: Configuraciones de distintos tipos de secciones.

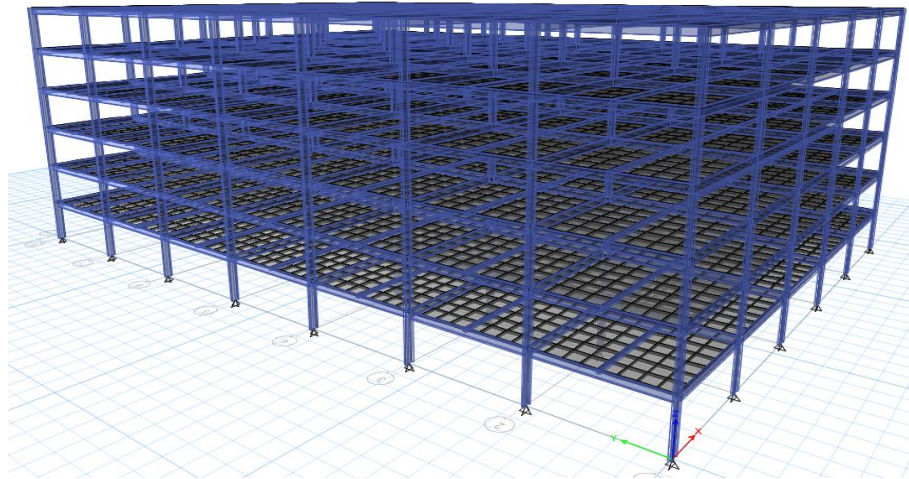


Figura 20: Vista 3D de la estructura..

Ahora regresando al menú de definición y en las opciones de propiedades de sección vamos a la opción de losa se definirán las propiedades de la losa así con sus modificadores y material para luego dibujarla en el modelo.

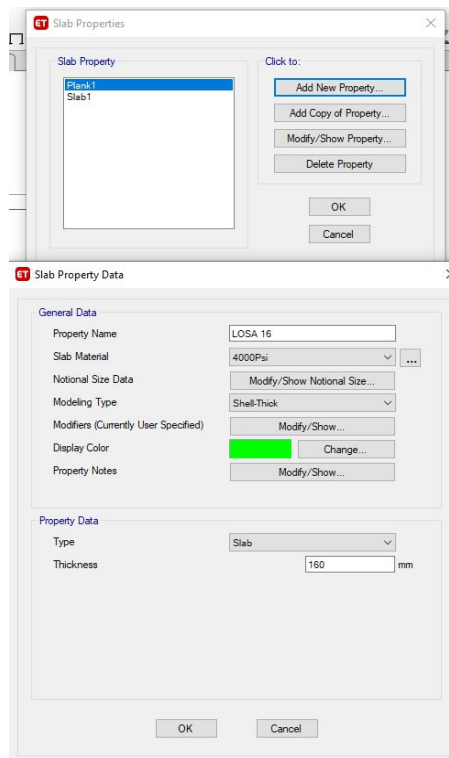


Figura 21: Definición de elemento losa.

5.4.3. Espectro sísmico de respuesta.

Ahora es en el menú de definición y la opción de función habrá que ingresar el espectro de respuesta que se calculó anteriormente, la opción será desde de un archivo donde se deberá cargar el archivo en la ventana emergente.

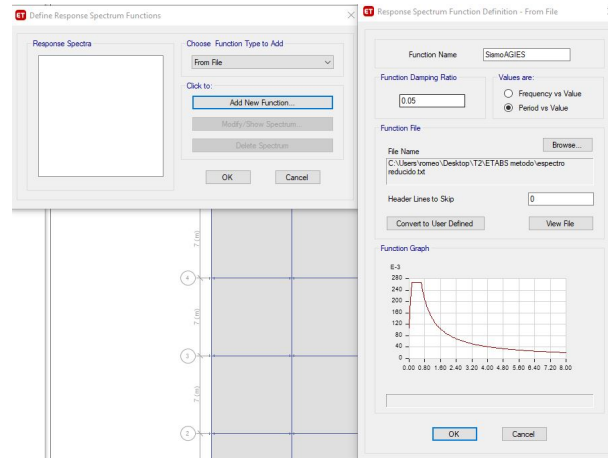


Figura 22: Definición del espectro de respuesta en ETABS.

5.4.4. Patrones de carga.

En el mismo menú en la opción de definir patrones de carga se deben crear tres patrones mas los cuales son sobrecarga, y sismo en direcciones X y Y, para cada uno se debe poner su tipo correspondiente y en los de tipo sísmica se debe modificar la dirección de la excentricidad y los valores de C y K.

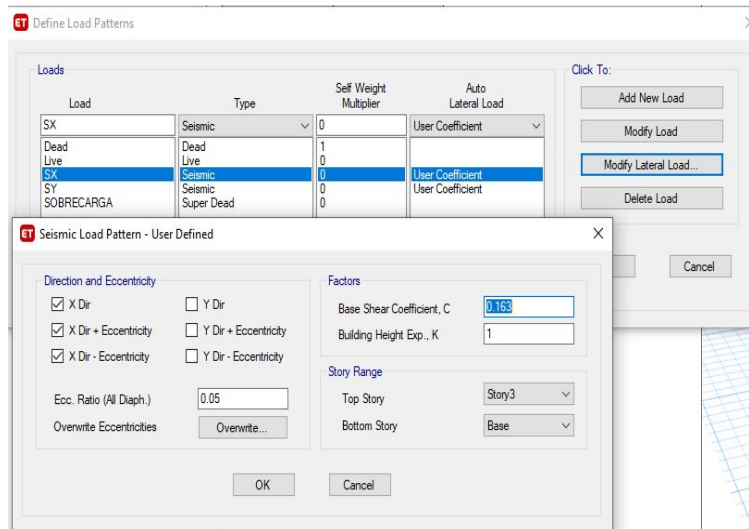


Figura 23: Definición de patrones de carga.

5.4.5. Combinaciones de carga.

El siguiente paso en el menú de definición en el comando de combinaciones de carga habrá que añadir todas las combinaciones a usar según la NSE-2 capítulo 8 sección 8.3, hasta la combinación número 5, debido a que las demás no aplican según las descripciones dadas por la norma.

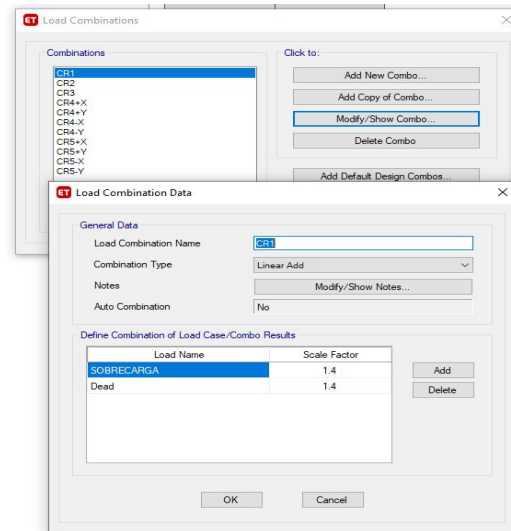


Figura 24: Definición de las combinaciones de carga.

5.4.6. Fuente de masa.

En el menú de definición hay que generar la fuente de masa, esta se configura como se muestra en la siguiente figura.

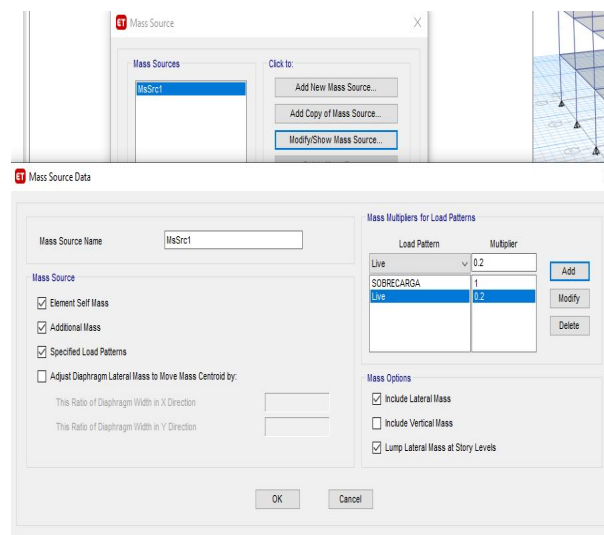


Figura 25: Definición de la fuente de masa.

5.4.7. Asignación de cargas a losas.

Ahora seleccionando cada losa se le asignarán las cargas correspondientes, a la ocupación y las cargas muertas establecidas y apropiadas para la estructura, una vez seleccionada la losa en el menú de asignación se busca cargas de losa y se le asigna una carga uniforme.

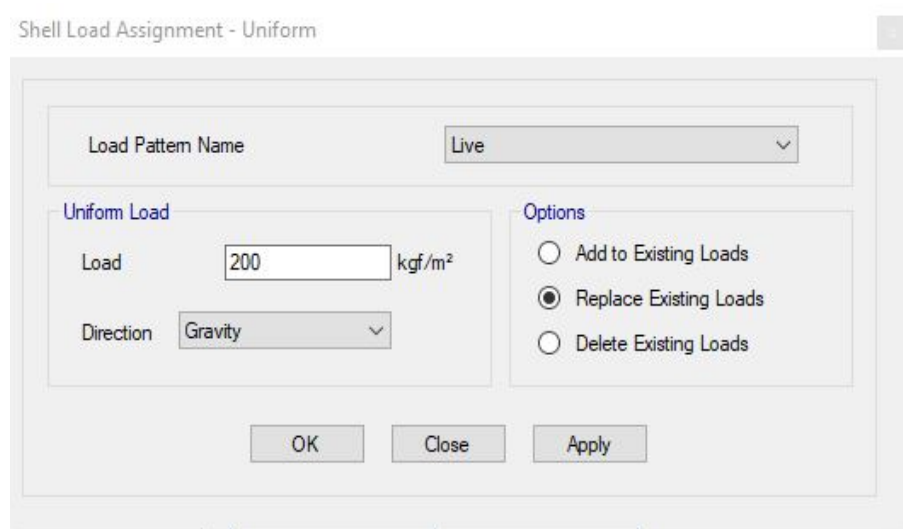


Figura 26: Asignación de cargas a las losas.

5.4.8. Asignación de diafragmas rígidos.

En el mismo menú de asignación se ira al menú de "Shell" donde se asignará un diafragma rígido para cada piso y asignarlo de forma correspondiente.

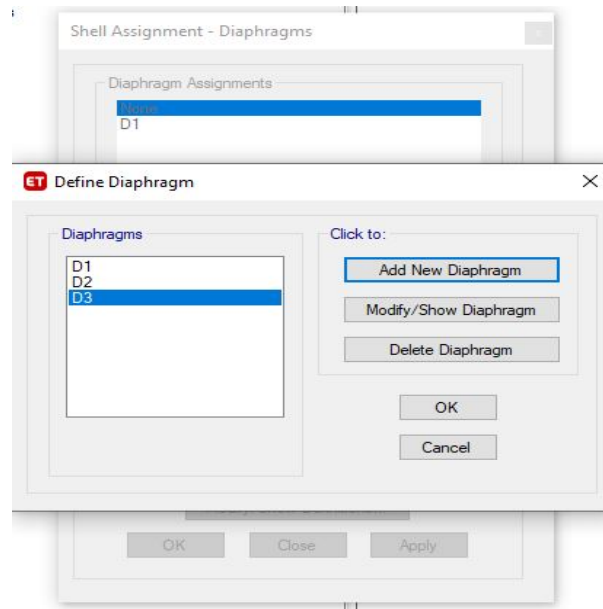


Figura 27: Definición y asignación de diafragmas.

5.4.9. Restricción de la base.

Seleccionando la base de la estructura, y se procederá asignar una articulación, esto debido a que es la condición más común en las estructuras de acero.

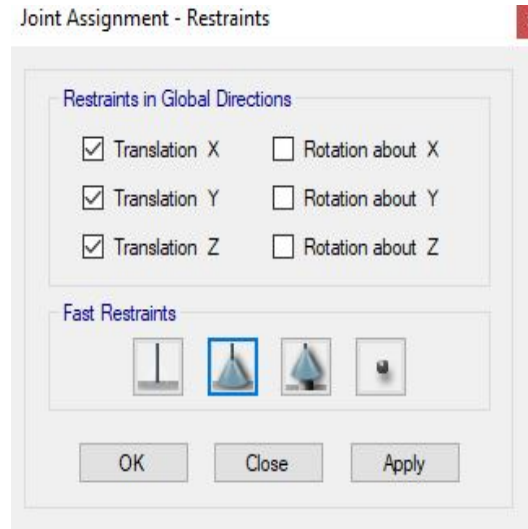


Figura 28: Restricción de la base.

5.4.10. Ajuste de casos de carga.

En esta sección es necesario verificar el tipo de los sismos estáticos, en estos hay que verificar que los casos de carga estén configurados con su dirección, sismo de respuesta y valor de la gravedad.

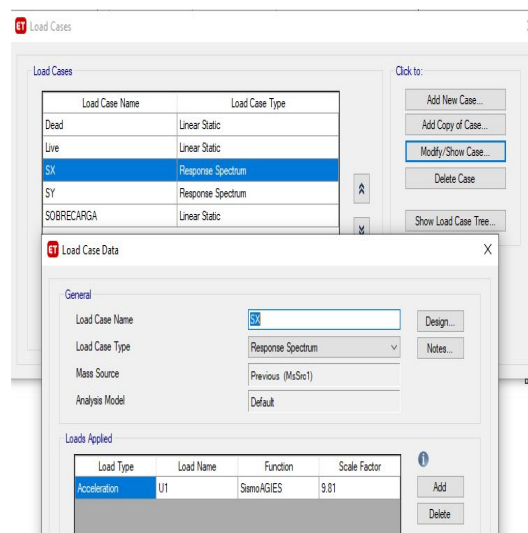


Figura 29: Configuración de casos de carga.

5.4.11. Configuración del mallado.

En el menú de sensación en el menú de “ Shell ” esta la opción de opciones del mallado del suelo en esta tendremos la opción de configurar la forma y tamaño del mallado de las losas, y se configurar como se muestra en la siguiente imagen:

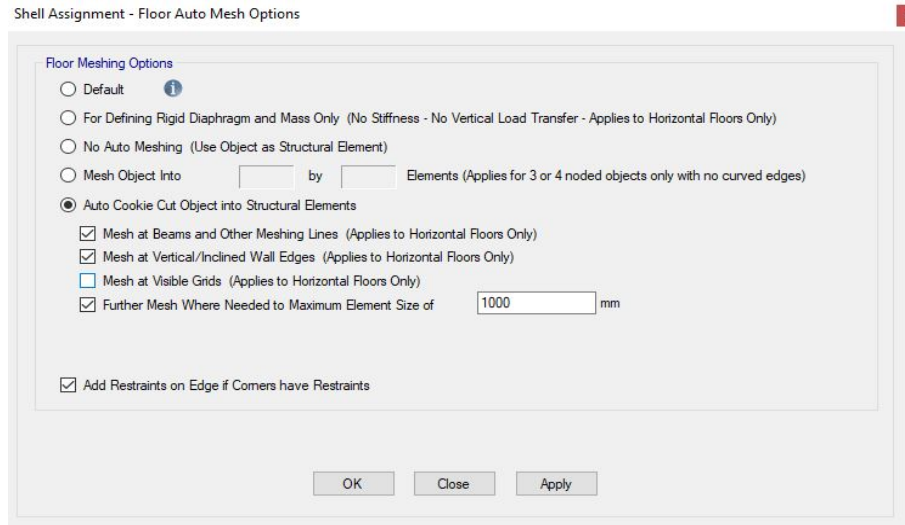


Figura 30: Asignación del mallado.

5.5. Análisis de la estructura sin riostras.

En el menú de diseño y en las opciones de elementos de acero en la opción de selección de combinaciones de carga en la ventana emergente escogeremos las combinaciones de carga que definimos anteriormente para el diseño de la estructura.

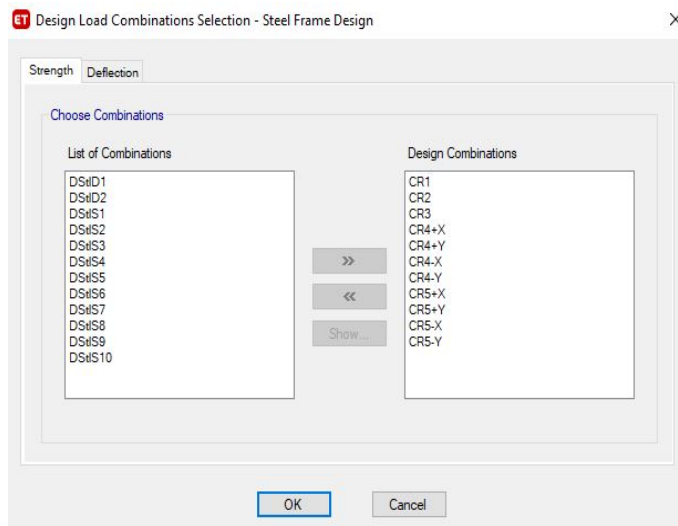


Figura 31: Carga de combinaciones de diseño

Una vez hecho esto solo hay que correr el modelo, una vez que el programa termine de correr el modelo, hay que realizar el diseño de los elementos de acero, ahora el programa determinará la relación entre demanda y capacidad de los elementos y así establecer si los elementos serán funcionales o no.

5.6. Análisis tiempo-historia.

5.6.1. Obtención de registros sísmicos.

Para la obtención de los registros sísmicos será necesario acceder a web de: strongmotioncenter.org esta web es un centro de información sísmica.

En esta página se pueden buscar distintos acelerogramas con el fin de tener una serie de registros para luego descargarlos.

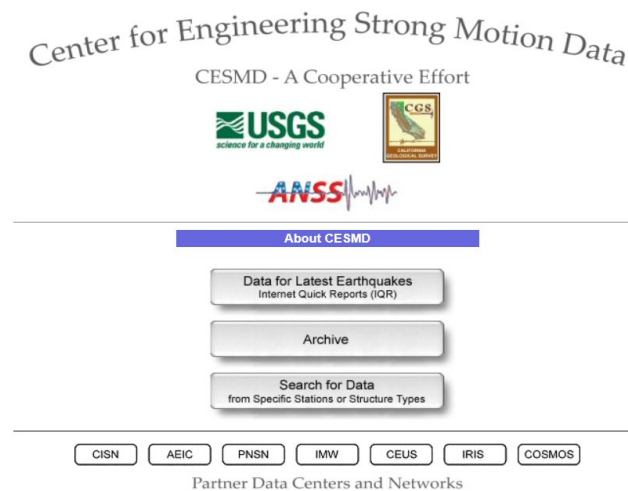


Figura 32: Centro de datos de movimiento de suelo.

5.6.2. Aplicación de SeismoSelect.

Seismoselect es un software desarrollado por Seismosoft que permite la selección de registros históricos de bases de información y escalar según los sismos de respuesta.

Lo primero es ingresar unos parámetros iniciales, estos son magnitud mínima y distancia a la falla después de eso se pedirá que este seleccione registros de las bases de datos.

Selection Parameters

Magnitude MIN 5.500 MAX 7.500

Distance (km) Epicentral Distance MIN 0.000 MAX 150

Vs30 (m/sec) MIN 500.000 MAX 1500.000

Faulting Style Strike Slip Pulse Pulse-Like

Significant Duration (D5-95) MIN 0.000 MAX 20.000

PGA (g) MIN 0.150 MAX 0.750

Event date (month/day/year) MAX 31/12/2020 00:00:00 MIN 1/01/1980 00:00:00

Event Nation

Maximum number of records per event 10

Maximum number of required candidates 1000

0%

Select Candidate Records

Figura 33: Interfaz de selección de parámetros de SeismoSelect.

Una vez el programa nos dé todos los registros que tengan estos parámetros, se podrá ver la forma del espectro de respuesta, además de datos de ubicación, su fecha, coordenada y su magnitud.

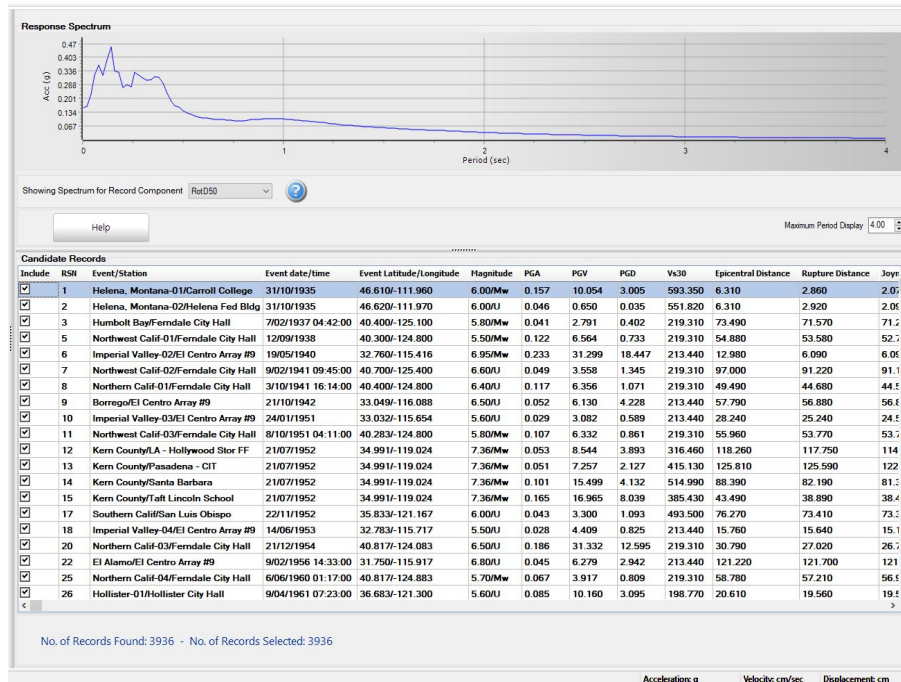


Figura 34: Posibles registros de aceleración.

El siguiente paso es realizar el filtrado y selección, según el sismo de respuesta calculado según las normas de AGIES, para esto se deben definir las coordenadas espectrales objetivas como se muestra en la siguiente figura:

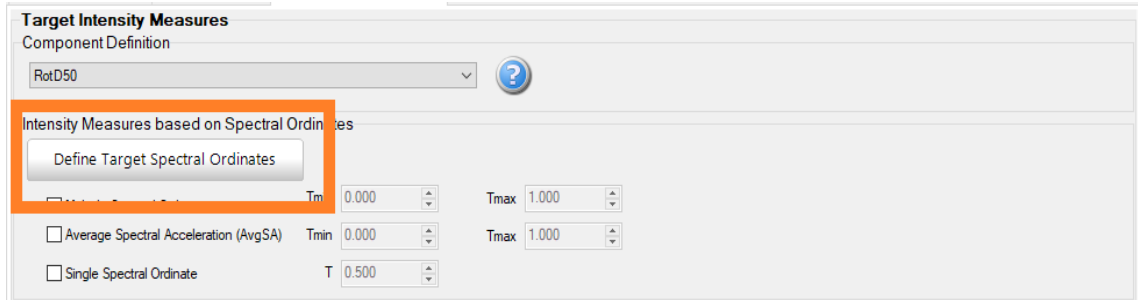


Figura 35: Definición de espectro objetivo.

En la ventana emergente se debe seleccionar la opción de cargar un espectro desde un archivo. Para esto se cargara el sismo de respuesta sin reducir y finalmente se le dará aceptar para que este cargue el espectro.

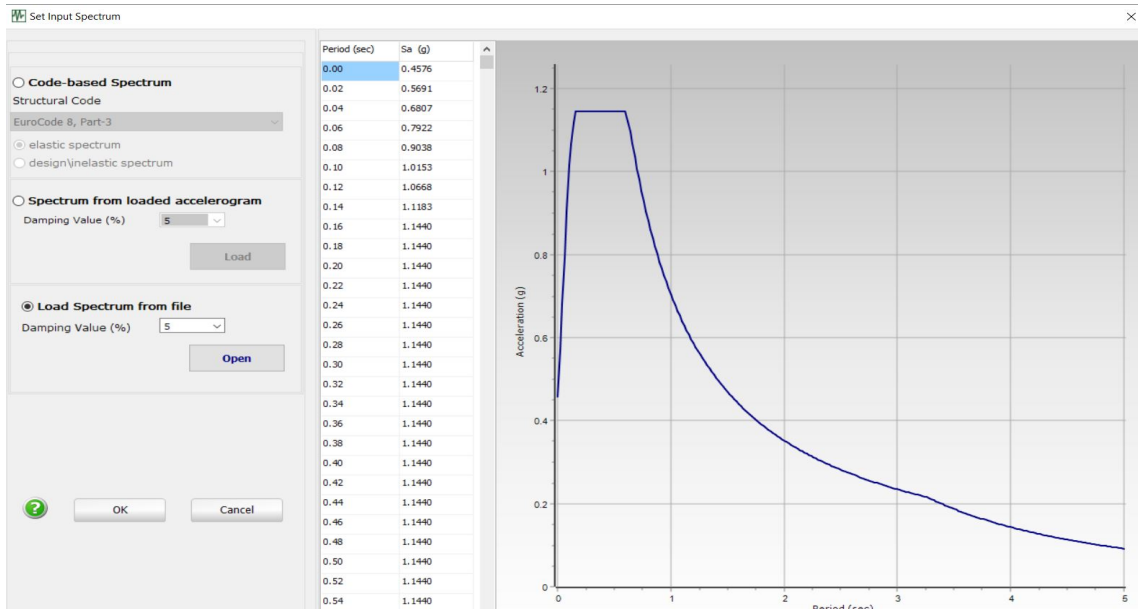


Figura 36: Ingreso de espectro de AGIES.

Una vez hecho eso se le pide que seleccione los registros y de los 6154 candidatos este filtrará a los que mejor se adaptan a nuestro sismo de respuesta.

Record Selection

Candidate Records: 3936

Select and Sort All Records

Select only Records with Error Smaller than %

Select the Records for which the Average Spectrum has the Best Fit (max. 5 records with Academic licenses)

Scaling

Do not Scale Records

Scale Records

Scaling Factor Limits

Set Scaling Factor Limits

Min. Scaling Factor

Max. Scaling Factor

100%

Records selection completed

[Select Records](#)

[Help](#)

Figura 37: Selección de registros.

Finalmente se despliegan los sismos de respuesta según a los registros históricos y descargarlos para su uso.

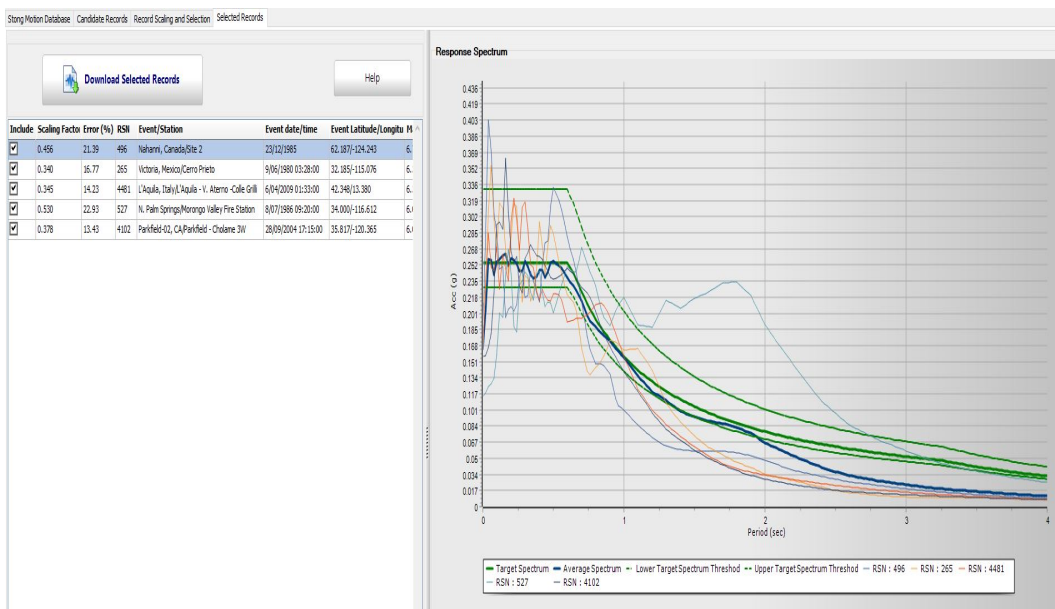


Figura 38: Gráficas de los registros seleccionados.

Para la descarga se nos darán los números de secuencia y registros, y además del enlace directo a la base de datos del centro de investigación de ingeniería sísmica del Pacífico.

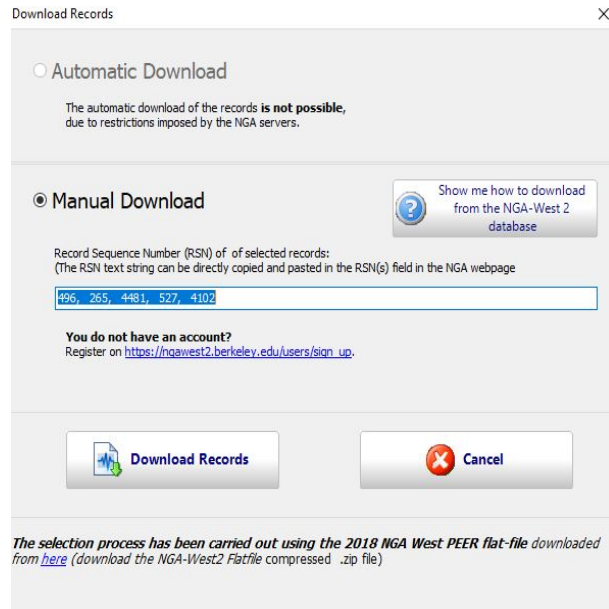


Figura 39: Descarga de registros.

Una vez en la plataforma solo hay que buscar los registros según a los números generados por SeismoSelect y descargar los acelerogramas para luego procesarlos.

Results -- Metadata

Click heading of the column to be sorted in ascending order

Rescale Using Checked Records

	Result ID	Spectral Ordinate	Record Seq. #	MSE	Scale Factor	Tp(s)	D5-75(s)	D5-95(s)	Arias Intensity (m/s)	Event	Year	Station	Mag	Mechanism	P
<input type="checkbox"/> view	1	SRSS	265	-	1.0	-	4.4	8.2	2.0	Victoria, Mexico	1980	Cerro Prieto	6.33	strike slip	1
<input type="checkbox"/> view	2	SRSS	496	-	1.0	-	4.5	7.3	0.9	Nahanni, Canada	1985	Site 2	6.76	Reverse	0
<input type="checkbox"/> view	3	SRSS	527	-	1.0	-	3.8	6.7	0.7	N. Palm Springs	1986	Morongo Valley Fire Station Parkfield	6.06	Reverse Oblique	5
<input type="checkbox"/> view	4	SRSS	4102	-	1.0	1.022	1.6	6.5	0.9	Parkfield-02, CA	2004	- Cholame 3W L'Aquila - V.	6.0	strike slip	2
<input type="checkbox"/> view	5	SRSS	4481	-	1.0	-	4.3	8.4	1.4	L'Aquila, Italy	2009	Aterno - Colle Grilli	6.3	Normal	0

Download Options

Download Search Results (metadata+spectra) Download Time Series Records (metadata+spectra+traces)

Figura 40: Descarga de PEER Ground Motion Database.

Además de los registros sugeridos por SiesmoSelect se añadieron más registros, con el fin de tener mayor información se añadieron otros 8 registros con el fin de tener mayor cantidad de datos, de todos estos se seleccionaron 7 que son los requeridos por los procedimientos.

Cuadro 7: Resumen de registros sísmicos.

Evento	RSN	Año
Kobe, Japón	1100	1995
Imperial Valley	159	1979
El mayor Cucapah	5831	2010
Loma Prieta	741	1994
Northridge	1082	1994
Chuetsu	4844	2007
Chi-Chi	3843	1999
Central	24	1960
Gazli, USSR	126	1976
Niigata-Japón	4151	2004
San Salvador	568	1986
Dinar, Turkey	1136	1995
Friuli, Italia	121	1976
México	265	2017

5.6.3. Configuración del caso de sismo máximo creíble.

Este se configura igual que el sismo de respuesta utilizado anteriormente, pero este se calculará utilizando un factor $K_d = 1$, este equivale a un sismo extremo.

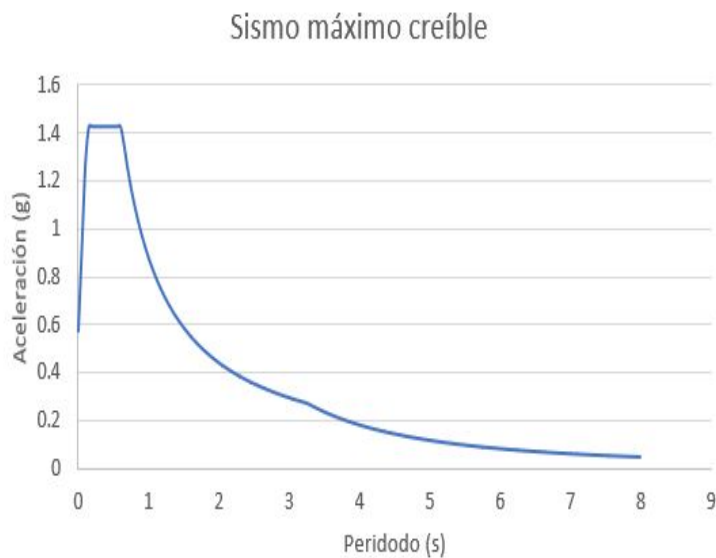


Figura 41: Sismo máximo creíble.

5.6.4. Configuración de caso Modal.

El siguiente paso es modificar el caso modal, para ello en el menú de definición se busca la opción de “ Modal Case ” en esta se debe modificar el caso existente, en la opción de “Sub type” se cambia a “Ritz” y se agregaran dos cargas aplicadas, estas dos cargas serán del tipo de aceleración en las direcciones X y Y.

Load Type	Load Name	Maximum Cycles	Target Dyn. Par. Ratio, %
Acceleration	UX	0	99
Acceleration	UY	0	99

Figura 42: Configuración de caso modal.

5.6.5. Configuración de caso gravitacional no lineal.

Para esto hay que ir al menú de casos de carga, y luego definimos un nuevo caso.

En este caso se debe poner un tipo de carga: “ Nonlinear Static ”, luego debemos agregar tres cargas aplicadas estas son la carga muerta, la sobrecarga y la carga viva. La carga viva se le debe poner el modificar a un 0.25

El caso modal debe estar seleccionado el que ya definimos anteriormente y la opción de “ Geometric Nonlinearity Option ” se debe escoger la opción “ P-Delta ”

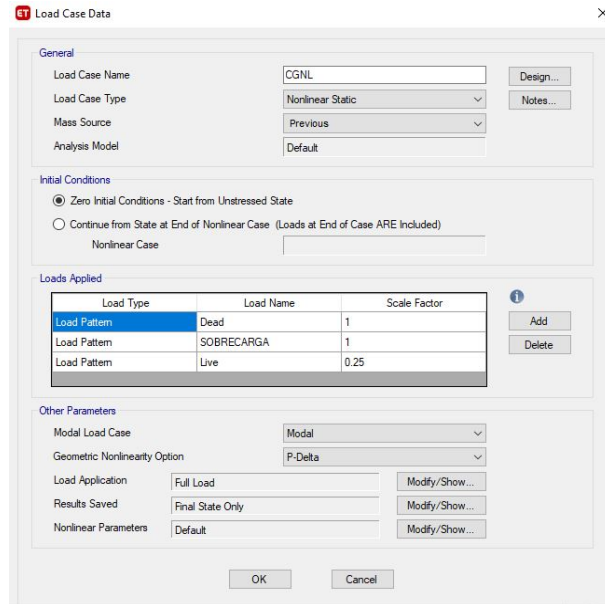


Figura 43: Configuración de caso gravitacional no lineal.

5.6.6. Configuración de análisis tiempo historia en ETABS.

Primero se debe ingresar el sismo máximo creíble, el procedimiento es el mismo que en la sección 5.4.3. Seguidamente se debe ingresar los registros en el mismo menú donde se definieron los sismos de respuesta, se debe seleccionar la opción de “ Time History ”.

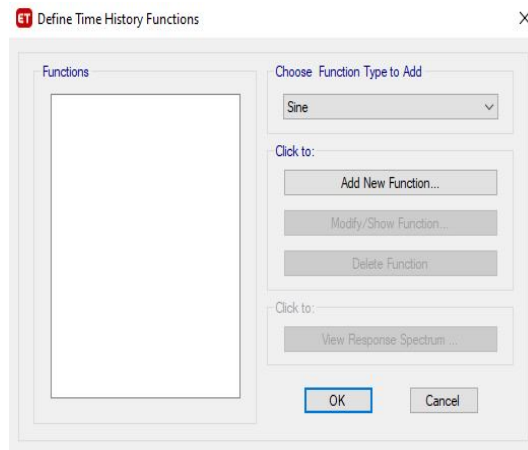


Figura 44: Ventana de definición de análisis tiempo historia.

En la ventana emergente hay que cargar los registros de aceleración en ambas direcciones con el cuidado de configurar el intervalo de tiempo específico para cada acelerograma.

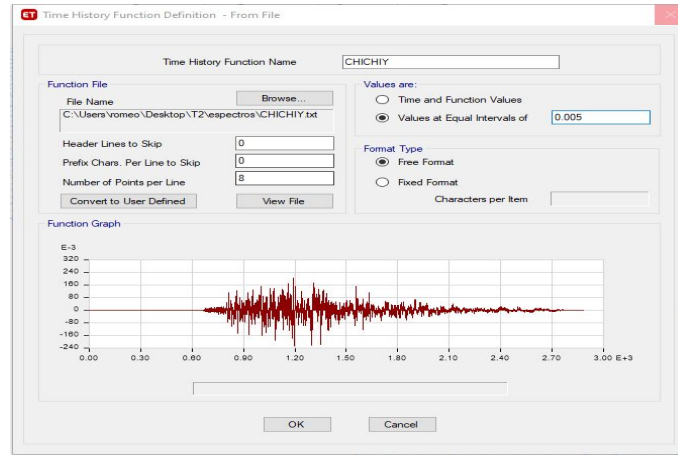


Figura 45: Configuración de acelerogramas.

Finalmente los seleccionados para el análisis fueron:

- Northrige de 1994.
- Central 1960.
- Kobe 1995.
- Loma Prieta 1994.
- México 2017
- Niigata 2004.
- El Salvador 1986.

5.6.7. Matcheado de acelerogramas con espectro máximo creíble.

El siguiente paso será realizar un macheado de los acelerogramas con el sismo máximo creíble esto para que los registros estén escalados en función del caso creíble, para esto volvemos a la definición de funciones tiempo historia, pero ahora en ves de definir una función se hará un macheado.

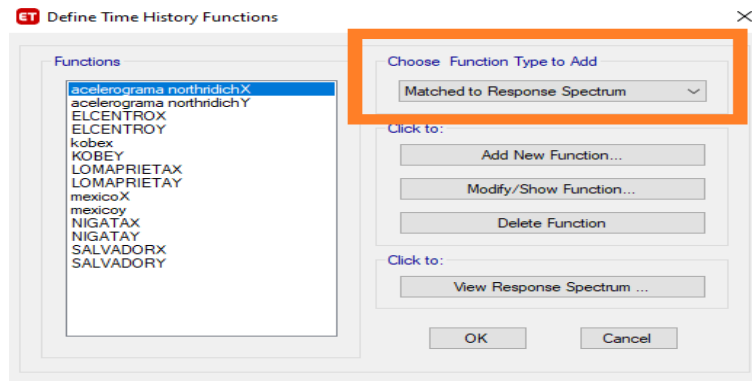


Figura 46: Configuración de acelerogramas.

En la ventana emergente, se deben establecer el espectro objetivo que es el máximo creíble así como el acelerograma, una vez realizado el machado tendremos como resultado el acelerograma escalado en función de nuestro espectro, este proceso se debe repetir para cada acelerograma en ambas direcciones.

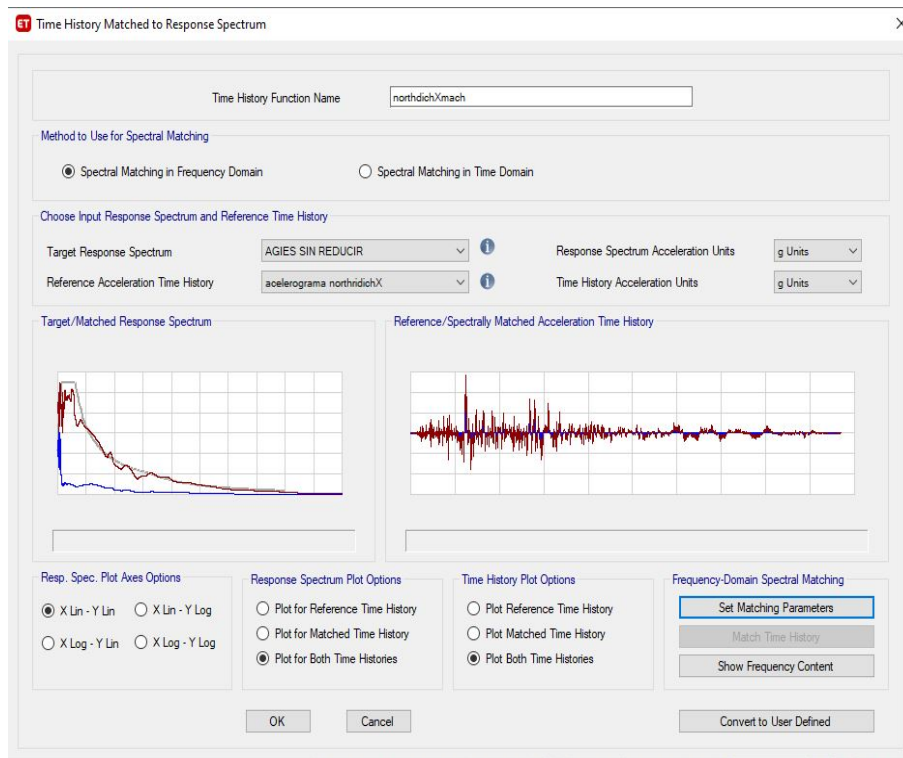


Figura 47: Configuración del macheado del acelerograma.

Para el siguiente paso en el menú de definición se definirá un nuevo caso de carga, para cada macheado que se definió, en esta ventana debemos establecer un caso de “ Time History ” con un subtipo “ Nonlinear Direct Integration ”

Luego en cargas aplicadas serán dos de tipos aceleración, en cada dirección, luego se

ingresa uno de los “ match ” y se aplica la escala apropiada de 9.81, y finalmente se deben ingresar la cantidad de datos que tiene cada acelerograma y el intervalo de tiempo de cada acelerograma.

Seguidamente hay que seleccionar la opción de “ P-Delta ” en “ Geometric Nonlinearity Option ”

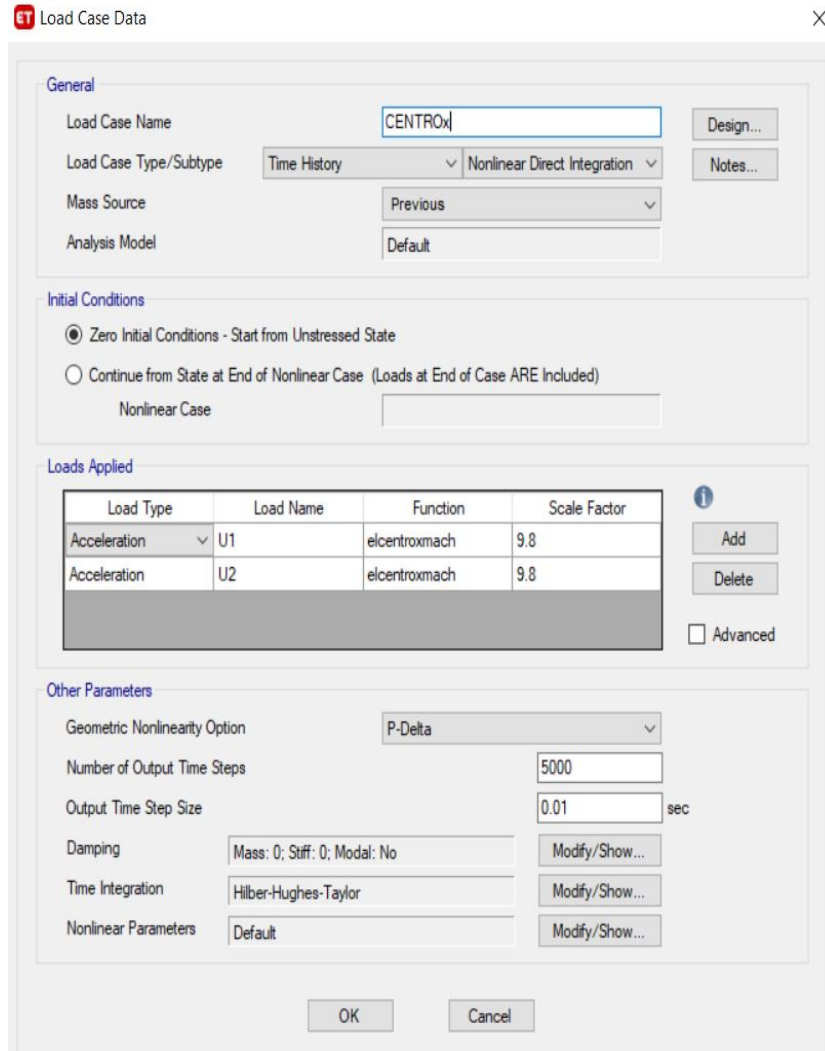


Figura 48: Configuración del caso de carga.

Lo siguiente es entrar en las opciones avanzadas, para eso se debe seleccionar la opción de “ Modify/Show ” y se debe habilitar la opción de “ Aditonal Modal Damping ” y dejamos el valor mínimo sugerido por ETABS y repetirlo para cada caso de carga.

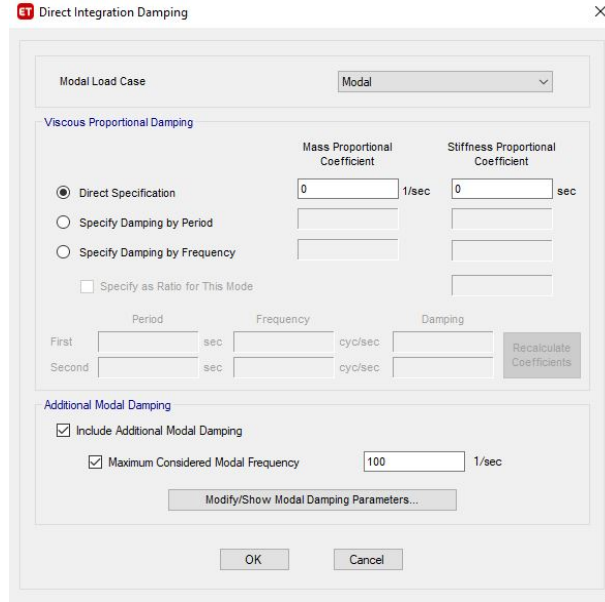


Figura 49: Configuración del amortiguamiento mínimo en el caso de carga.

5.6.8. Cálculo del factor de reducción de respuesta.

Para calcular el amortiguamiento viscoso necesario hay que llegar una distorsión objetivo. para ello lo primero es determinar el factor de reducción de respuesta mediante la siguiente educación:

$$B = \frac{D_{Max}}{D_{Objetivo}} \quad (37)$$

Donde:

- D max: Es el valor de la distorsión más alta obtenida por el análisis de la estructura.
- D objetivo: La distorsión deseada de la estructura según los códigos o normativas.

La distorsión objetivo será puesta en función del daño deseado en la estructura, Este valor puede ser amplio y dependerá del criterio del diseñador. Sin embargo guías técnicas como lo son la Hazus del departamento de seguridad nacional de los Estados Unidos nos sugiere valores de distorsión como se pueden ver en el siguiente figura:

Propiedades la estructura			Distorsión limite según el estado de daño			
Edificación	Tipo	Altura (m)	leve	moderado	extenso	completo
Porticos de acero.	Bajo	7.2	0.006	0.0104	0.0235	0.06
	Medio	18	0.004	0.0069	0.0157	0.04
	Alto	46.8	0.003	0.0052	0.0118	0.03

Figura 50: Valores de distorsión límite según Hazus.

[29]

Con estos valores de referencia pondremos como nuestra distorsión objetivo un daño

moderado igual a 0.0069, con este tratamos de que los elementos no estructurales sufran un daño pequeño así reduciendo las reparaciones.

Para determinar el valor de distorsión mas alta, debemos correr el modelo; una vez corrido el modelo en las opciones de “ display ” y luego en “ Combined Story Response ” esta opción nos permite ver los desplazamientos por piso, su derivas, corte por piso y sobre ajustes. finalmente solo hay que revisar todos los casos de carga en ambas direcciones para determinar cual fue el desplazamiento máximo.

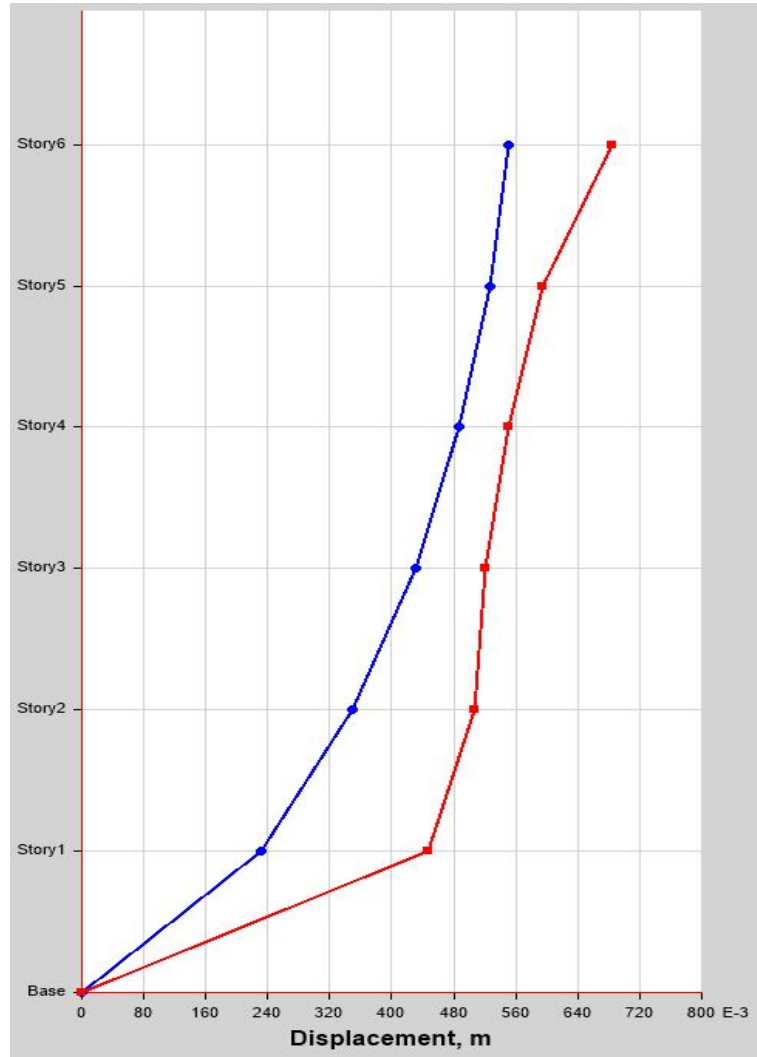


Figura 51: Resultados del análisis sin amortiguadores viscosos fluidos.

Los valores de distorsiones se resumen en el siguiente cuadro:

Aplicando la ecuación 37 se obtiene el siguiente valor para el factor de reducción de respuesta.

Cuadro 8: Resumen de valores de distorsiones para la aplicación de la ecuación 37

Caso	Distorsión	Desplazamiento (cm)
Máximo de análisis	-	68.43
Máximo permitido por norma	0.02	43.20
Daño moderado según Hazus	0.007	15.12

Cuadro 9: Factor de reducción de respuesta.

Factor de reducción de respuesta
4.53

5.6.9. Cálculo del amortiguamiento efectivo.

Para determinar este valor es necesario despejar B_{eff} de la siguiente ecuación.

$$B = \frac{2.31 - 0.41 \ln(Bu)}{2.31 - 0.41 \ln(B_{eff})} \quad (38)$$

Donde:

- Bu: Es el amortiguamiento inherente de la estructura que usualmente se fija en 5 %

de esta manera se obtiene el amortiguamiento efectivo, este incluye la acción del disipador de energía y el amortiguamiento inherente de la estructura.

- $B_{eff} = 46.47\%$

Descontando el amortiguamiento inherente se obtiene el amortiguamiento viscoso que se requiere:

- $B_{eff} = 41.47\%$

Para este caso utilizaremos un valor de 45

5.6.10. Modelado matemático del disipador viscoso.

El comportamiento del amortiguador de fluido viscoso sera idealiza como un amortiguador puro, por lo cual se usara la siguiente ecuación para describir su comportamiento.

$$F = C * V^\alpha \quad (39)$$

Donde:

- F: La fuerza de amortiguador.

- C: la constante del amortiguador.
- V: velocidad.

En la ecuación anterior α puede tomar varios valores mientras menor sea el valor de α mas eficiente sera el amortiguador; por lo general los valores de α están entre 0.3 y 1, para este caso se utilizara el valor de 0.5.

5.7. Diseño preliminar de los disipadores fluidos viscosos.

5.7.1. Configuración del sistema

Para impedir que la colocación de los sistemas de amortiguación generen asimetría en la estructura lo mejor sera colocarlos en el perímetro en relación con el centro geométrico de la estructura.

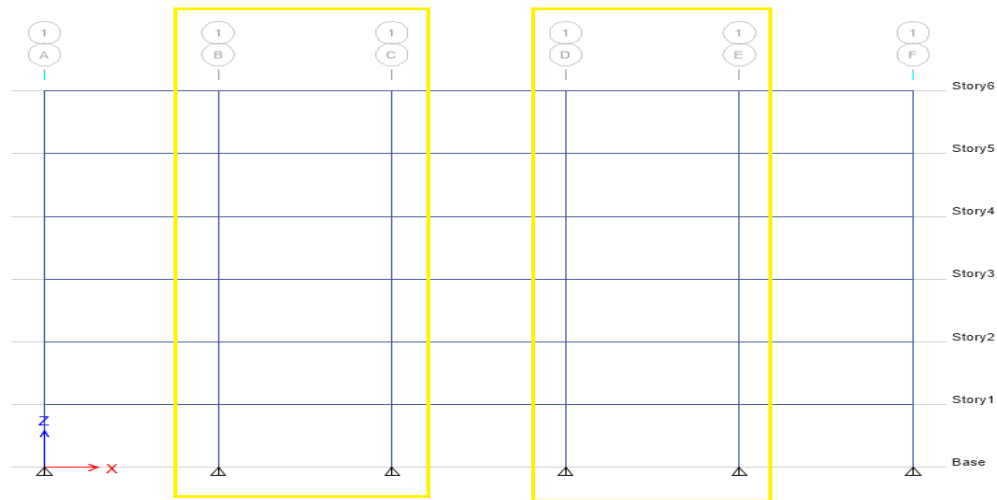


Figura 52: Locación de los disipadores fluidos viscosos a lo ancho.

5.7.2. Cálculo de la rigidez

Para poder calcular la rigidez del marco típico lo primero que se necesita son las propiedades de los perfiles utilizados en el modelo para este caso se van a utilizar el área del perfil W18x55

Con los datos del perfil y la geometría de la estructura se puede calcular la rigidez del sistema con la siguiente ecuación:

$$K = \frac{EA}{L} \quad (40)$$

Donde:

- E: Es el modulo de elasticidad del acero
- A: Área del perfil
- L: es la longitud del brazo metálico.

Cuadro 10: Rigidez del sistema

E (ksi)	Area (in2)	L(m)	K (T/m)
29000	16.2	5.20	4098.33

5.7.3. Cálculo del coeficiente de amortiguamiento (C)

Ya con el valor de α seleccionado en la los inicios sección 5.9 y así resolver la siguiente ecuación:

$$\beta_H = \frac{\sum_j \lambda C_j \phi_{rt}^{1+\alpha} \cos^{1+\alpha} \theta_j}{2\pi A^{1-\alpha} \omega^{2-\alpha} \sum_i m_i \phi_i^2} \rightarrow \sum C_j = \frac{\beta_H 0.2\pi A^{1-\alpha} \omega^{2-\alpha} (\sum_i m_i \phi_i^2)}{\lambda (\sum \phi_{rj}^{1+\alpha} \cos^{1+\alpha} \theta_j)} \quad (41)$$

Donde:

- β_H : amortiguamiento viscoso de la estructura.
- λ : parámetro lambda.
- C_j : coeficiente de amortiguamiento del disipador j.
- ϕ_{rj} : desplazamiento relativo entre ambos extremos del disipador j en la dirección horizontal (con sismo de diseño).
- θ_j : ángulo de inclinación del disipador j.
- A: Amplitud de desplazamiento del modo fundamental (desplazamiento modal de la losa del ultimo nivel).
- ω : Frecuencia angular.

5.7.4. Resolución de la ecuación del coeficiente de amortiguamiento (C)

Los valores de peso y masa por nivel se resumen en el siguiente cuadro:

Cuadro 11: Pesos por piso típico

Piso	Masa (ton)
típico	977.42

El valor de β_H

Este valor siendo $\beta_H = 45\%$. Mientras que el ángulo de inclinación es de 63° como se puede ver en la siguiente imagen:

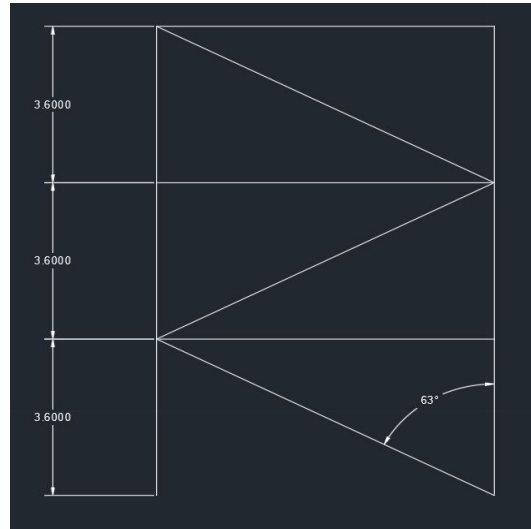


Figura 53: Ángulo de inclinación del dissipador.

Normalización de los valores del modo fundamental de la estructura.

Para hacer esto debemos ir al menú “ Display ” luego en “ Derfomred Shape ” en este debemos seleccionar “ Modal Case” y verificar los desplazamientos que tienen en el modo número 1, luego procedemos a calcular φ_i

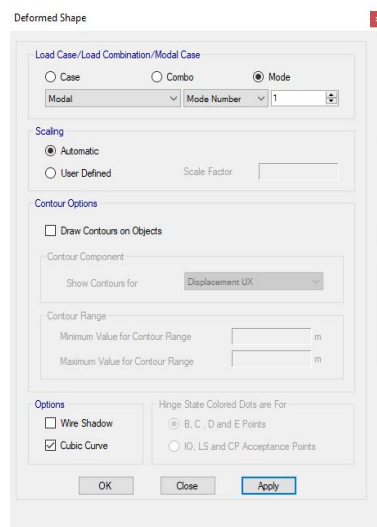


Figura 54: Derivas por casos modales.

Una vez que tenemos los valores de las derivas por piso debemos considerar que la deriva del ultimo piso representara el 100 % mientras que las demás derivas representaran el porcentaje del máximo. Luego simplemente se eleva al cuadrado el valor normalizado como se muestra en el siguiente cuadro.

Cuadro 12: Normalización de las derivas del modo fundamental de la estructura.

Piso	Máxima modal	φ_i	φ_i^2
1	0.000009	0.82	0.67
2	0.000011	0.85	0.72
3	0.000013	0.87	0.75
4	0.000015	0.94	0.88
5	0.000016	0.99	0.99
6	0.0000165	1	1

Desplazamiento relativo de la estructura.

Para esto solo debemos tomar los valores del modo fundamental y tomar la deriva relativa entre ambos extremos del disipador en su dirección de desplazamiento. como tal los valores relativos se muestran en el siguiente cuadro:

Cuadro 13: Desplazamiento relativo de la estructura.

Piso	φ_{rj}
1	0.82
2	0.03
3	0.02
4	0.07
5	0.06
6	0.01

Factores de participativo modal.

Para esto necesitamos calcular el valor de participación del factor del enésimo modo que va a estar representado por Γ y se describe con la siguiente ecuación:

$$\Gamma_n = \frac{L_n}{M_n} \quad (42)$$

Donde:

- M_n : es la masa modal de participación
- L_n : Vector de coeficientes.

donde el vector de coeficientes se calcula de la siguiente manera:

$$L_1 = \{\phi_1\}^T [m] \{\phi_1\} = \begin{Bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \\ \phi_4 \\ \phi_5 \\ \phi_6 \end{Bmatrix}^T \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{Bmatrix} \quad (43)$$

Con nuestros valores la solución a la ecuación sera:

$$L_1 = \begin{Bmatrix} 0.82 \\ 0.85 \\ 0.87 \\ 0.94 \\ 0.99 \\ 1 \end{Bmatrix}^T \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{Bmatrix} = 5.47 \quad (44)$$

Mientras que la masa modal participativa se calcula de la siguiente manera:

$$M_1 = \{\phi_1\}^T [m] \{\phi_1\} = \begin{Bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \\ \phi_4 \\ \phi_5 \\ \phi_6 \end{Bmatrix}^T \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \\ \phi_4 \\ \phi_5 \\ \phi_6 \end{Bmatrix} \quad (45)$$

Con nuestros valores la solución a la ecuación sera:

$$M_1 = \begin{Bmatrix} 0.82 \\ 0.85 \\ 0.87 \\ 0.94 \\ 0.99 \\ 1 \end{Bmatrix}^T \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 0.82 \\ 0.85 \\ 0.87 \\ 0.94 \\ 0.99 \\ 1 \end{Bmatrix} = 5.02 \quad (46)$$

Finalmente el valor de Γ sera:

$$\Gamma_n = \frac{L_n}{M_n} = 1.091 \quad (47)$$

Periodo fundamental de la estructura.

Para el periodo de la estructura, en el menú de “Display” luego “Show Tables” en esto debemos pedirle la información de “Modal directions factors” esta nos desplegará el periodo del modo número uno.

Case	Mode	Period sec	UX	UY	UZ	RZ
Modal	1	1.371	0	1	0	0
Modal	2	1.359	0.999	0	0	0.001
Modal	3	1.193	0.001	0	0	0.999
Modal	4	0.465	0	1	0	0
Modal	5	0.463	1	0	0	0
Modal	6	0.405	0	0	0	1
Modal	7	0.302	0	1	0	0
Modal	8	0.302	1	0	0	0
Modal	9	0.263	0	0	0	1
Modal	10	0.03	0.006	0	0	0.994
Modal	11	0.016	0	0	0	1
Modal	12	0.011	0	0	0	1

Figura 55: Participación de modos fundamentales de la estructura.

Con esto tenemos el valor del periodo que es $T = 2.213$.

Ordenada al espectro

El siguiente paso es tener el valor de la ordenada al espectro en función de nuestro periodo fundamental de la estructura, este sera el punto en nuestro espectro de respuesta en el tiempo igual al periodo es decir el valor de $T = 2.213$ en el espectro de respuesta.

Nuestro valor de la ordenada al espectro (S_a)= 0.401

Factor de modificación de respuesta del disipador fluido viscos (β_{md}).

este factor estará en función de nuestro valor del amortiguamiento viscoso es decir de nuestro valor β_h y estos los podemos encontrar en el siguiente cuadro:[30]

Cuadro 14: Coeficientes de amortiguamiento.

Amortiguamiento efectivo (%)	β_{hm}
<2	0.8
5	1
10	1.2
20	1.5
30	1.8
40	2.1
50	2.4
60	2.7
70	3.0
80	3.3
90	3.6
≤ 100	4.0

Para nuestro valor de 60 tendremos un valor de $\beta_{hm} = 2.25$

Amplitud de la estructura.

Para calcular la amplitud de la estructura se necesitarán los siguientes valores:

- Γ : el valor participativo = 1.091.
- $T = 2.213$. s
- $g = 9.81$ m/s²
- $S_a = 0.401$ s
- $\beta_{hm} = 2.25$

Ahora debemos aplicar la siguiente ecuaciones:

$$A = \frac{g\Gamma S_a T}{4\beta_{hm} d \pi^2} \quad (48)$$

Por lo cual nuestra Amplitud (A) = 0.107 m

Frecuencia angular (ω)

Para calcular la frecuencia angular simplemente hay que aplicar la siguiente ecuación:

$$\omega = 2\pi \frac{1}{T} \quad (49)$$

al solucionarlo se tiene que la frecuencia angular de la estructura es $\omega = 2.839$ rad/s.

Cálculo de Lambda (λ)

Para calcular λ debemos aplicar la siguiente ecuación:

$$\lambda = \frac{2^{2+\alpha} (\Gamma(1 + \frac{\alpha}{2}))^2}{\Gamma(2 + \alpha)} = 3.496 \quad (50)$$

Resultado del coeficiente de amortiguamiento.

Procederemos a resolver la ecuación del coeficiente de amortiguamiento, lo primero sera resolver ciertas partes de la ecuación para ir complementando los cálculos.

Cuadro 15: Cálculos para determinar el coeficiente de amortiguamiento.

Piso	Masa	Cos (θ)	$\sum (\varphi_i^2) m$	$\sum \varphi_{rj}^{1+\alpha} \cos\theta^{1+\alpha}$
1	977.42	0.4539	977.42	0.0001497
2	977.42	0.4539	965.31	0.004085
3	977.42	0.4539	859.06	0.005767
4	977.42	0.4539	734.15	0.000898
5	977.42	0.4539	699.81	0.001431
6	977.42	0.4539	654.31	0.2264
		Suma	4890.06	0.2387

Así mismos necesitaremos el siguiente calculo:

$$\omega^{2-\alpha} = 4.784 \quad (51)$$

Finalmente con estos valores se puede completar la ecuación del coeficiente de amortiguamiento (41)

Cuadro 16: Valor del coeficiente de amortiguamiento.

	C (tonf*s/m)
Coeficiente de amortiguamiento	2588.45
Coeficiente de amortiguamiento por disipador	323.56

El valor de C se dividió entre la cantidad de dispositivos por piso y este será la capacidad de cada disipador

5.7.5. Modelado de la estructura con los disipadores fluidos viscosos.

Para el modelado lo primero es ir al modelo de ETABS, estos elementos serán definidos como elementos "link", para hacer esto hay que ir al menú definición en propiedades de sección buscaremos "link/support properties".

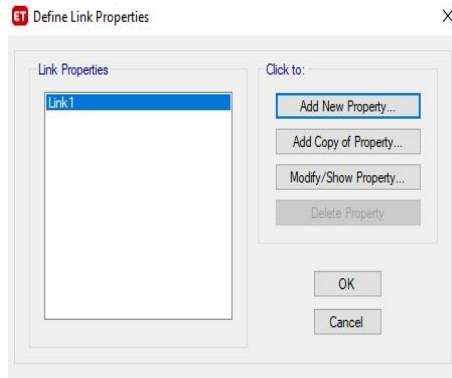


Figura 56: Definición de propiedades del disipador fluido viscoso.

La información que ingresaremos en la configuración de nuestro disipador fluido viscoso serán la siguientes:

- Tipo de "link": en este debemos seleccionar un "Damper-Exponential".
- La dirección sera U1.
- Debido a que se estableció un $\alpha = 0.5$ como exponente de amortiguamiento el disipador esta en el rango no lineal.
- luego debemos ingresar la rigidez y el coeficiente de amortiguamiento.

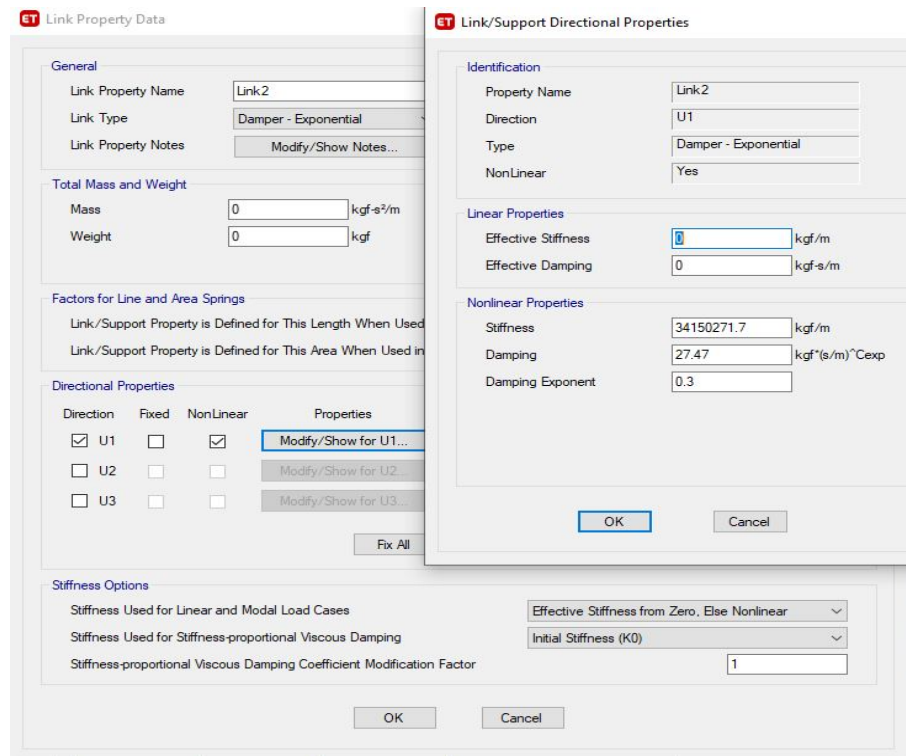


Figura 57: Ingreso de parámetros para la configuración del disipador

Una vez que se definieron las propiedades el siguiente paso es dibujar, este paso es simple, basta con ir a dibujar y luego en la opción de " Link " y se procede a dibujar los disipadores.

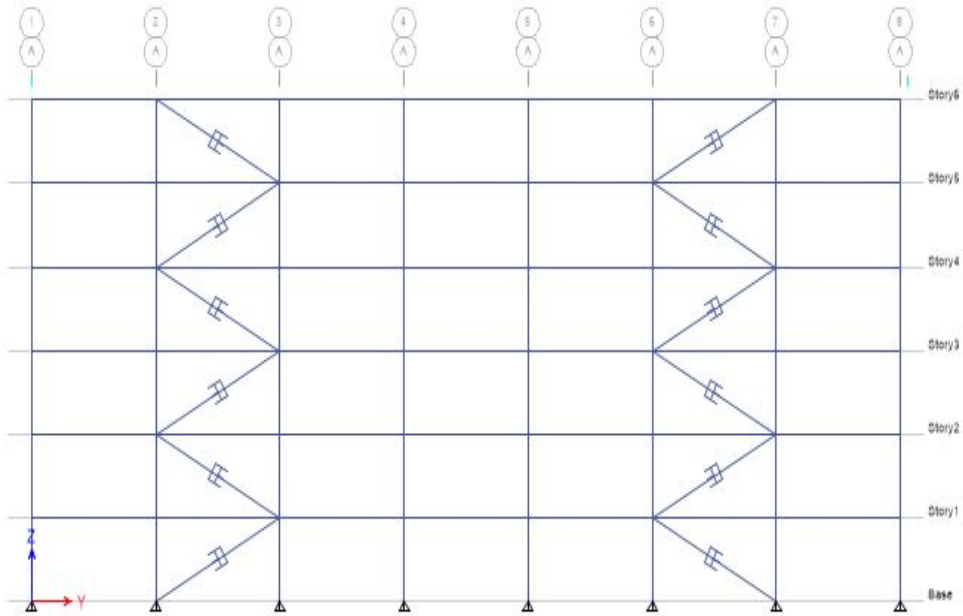


Figura 58: Vista de la estructura con disipadores fluidos viscosos a lo largo.

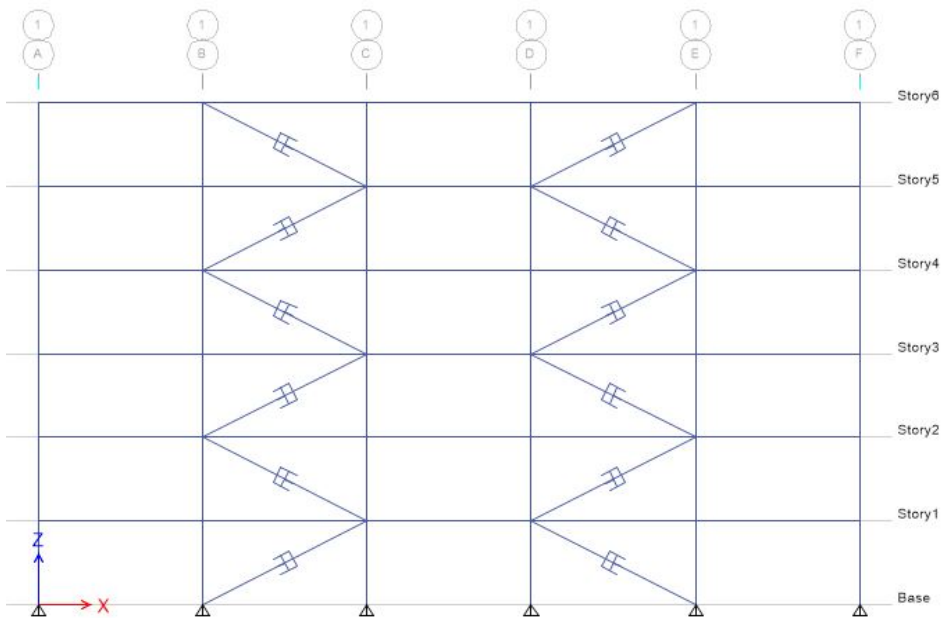


Figura 59: Vista de la estructura con disipadores fluidos viscosos a lo ancho.

5.8. Análisis del disipador.

5.8.1. Verificación lazo histérico.

El siguiente paso es obtener la gráfica de desplazamiento vs fuerza (curva de histéresis), para esto una vez que se corrió el modelo hay que ir al menú “ Display ” luego se busca la opción de “ Quick Hysteresis ”

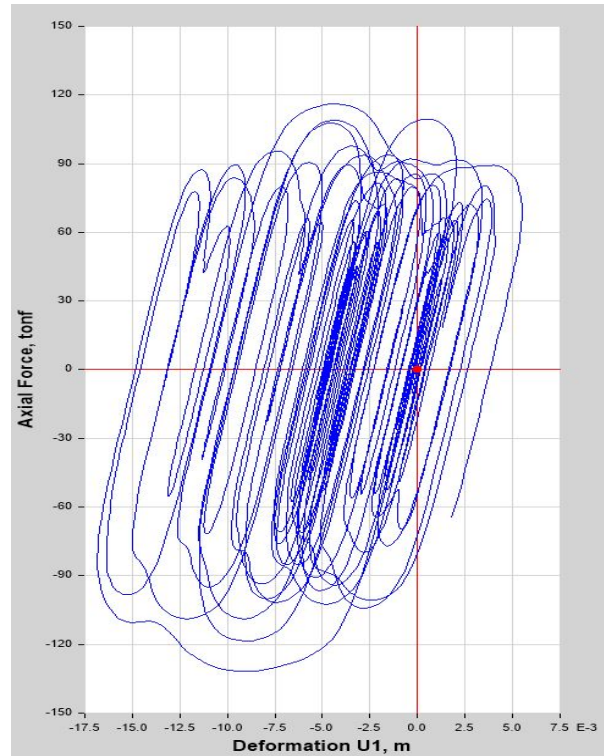


Figura 60: Curva de histéresis de los disipador fluido viscoso.

Esta gráfica representa el amortiguamiento de un disipador para un registro de aceleración, cuando se realiza este análisis para una estructura real es necesario verificar todos los amortiguadores en todos los casos. Estos deben tener la forma elíptica si esto no se cumple es necesario modificar las disposiciones de los disipadores o sus propiedades.

5.8.2. Balance de energía del sistema.

Para ver los valores de energía de entrada del sistema, la que toma la estructura y la que toma los disipadores, debemos dirigirnos a “ display ” y luego en "show tables", una vez allí debemos ir a los resultados del análisis, luego en el menú de ” other output items ” y luego la tabla de energía de los competentes antes de pedirle la tabla debemos tener todos los casos de carga seleccionados y todos los patrones de carga como se ha hecho anteriormente.

	Output Case	Input Energy tonf-m	Kinetic Energy tonf-m	Potential Energy tonf-m	Global Damping Energy tonf-m	Link Damper Energy tonf-m	Link Hysteresis Energy tonf-m	Energy Error tonf-m
▶	CENTROX	509.1552	94.2778	97.2755	327.8573	178.6491	0	0.0432
	CENTROY	475.5075	40.2388	36.446	315.8703	153.1652	0	0.033

Figura 61: Tabla de energía de los componentes de la estructura.

5.8.3. Análisis de distorsión de entrepiso.

Finalmente en el menú de "display" siguiendo la ruta de resultados del análisis pediremos la tabla de desplazamientos por piso para verificar el desplazamiento de la estructura.

Story	Output Case	Case Type	Step Type	Step Number	Direction	Drift	Label	X m	Y m
▶ Story3	CR4-X	Combination	Min		X	3.1E-05	28	21	49
	CR4+X	Combination	Min		X	3.1E-05	28	21	49
	CR2	Combination			X	2.9E-05	28	21	49
	CR3	Combination			X	2.9E-05	28	21	49
	CR4+Y	Combination	Max		X	2.5E-05	28	21	49
	CR4+Y	Combination	Min		X	2.5E-05	28	21	49
	CR4-Y	Combination	Max		X	2.5E-05	28	21	49
	CR4-Y	Combination	Min		X	2.5E-05	28	21	49
	CR1	Combination			X	2.2E-05	28	21	49
	CR4-X	Combination	Max		X	2E-05	28	21	49
	CR4+X	Combination	Max		X	2E-05	28	21	49
	CR5-X	Combination	Min		X	1.9E-05	28	21	49
	CR5-X	Combination	Min		X	1.9E-05	28	21	49
	CR5-Y	Combination	Max		X	1.4E-05	28	21	49
	CR5-Y	Combination	Min		X	1.4E-05	28	21	49

Figura 62: Derivas por piso de la estructura.

5.9. Selección de amortiguador apropiado.

Para esto una de las opciones es ir los catálogos de Taylor Devices inc, este nos da la capacidad que tiene sus amortiguadores, nosotros debemos escoger un amortiguador con una capacidad igual o mayor a la que estén sometidos los amortiguadores.

Este valor viene del análisis del software y la manera de obtenerlos es en “Display ” buscando la opción de “ Link output ” y en este pedimos las fuerzas a las que están sometidos los amortiguadores en este punto se nos desplegará una tabla con los distintos valores y se debemos escoger el valor más grande.

Story	Link	Unique Name	Link Element	Output Case	Case Type	Step Type	Location	P tonf	V2 tonf
Story2	K8	K8	K8	NORTHX	NonModHist	Max	I-End	8.924	0
Story2	K8	K8	K8	NORTHX	NonModHist	Max	J-End	8.924	0
Story2	K8	K8	K8	NORTHX	NonModHist	Min	I-End	-14.8728	0
Story2	K8	K8	K8	NORTHX	NonModHist	Min	J-End	-14.8728	0
Story2	K8	K8	K8	NORTHY	NonModHist	Max	I-End	9.3546	0
Story2	K8	K8	K8	NORTHY	NonModHist	Max	J-End	9.3546	0
Story2	K8	K8	K8	NORTHY	NonModHist	Min	I-End	-20.6202	0
Story2	K8	K8	K8	NORTHY	NonModHist	Min	J-End	-20.6202	0
Story2	K8	K8	K8	CENTROX	NonModHist	Max	I-End	25.6996	0
Story2	K8	K8	K8	CENTROX	NonModHist	Max	J-End	25.6996	0
Story2	K8	K8	K8	CENTROX	NonModHist	Min	I-End	-21.991	0
Story2	K8	K8	K8	CENTROX	NonModHist	Min	J-End	-21.991	0
Story2	K8	K8	K8	CENTROY	NonModHist	Max	I-End	24.3435	0
Story2	K8	K8	K8	CENTROY	NonModHist	Max	J-End	24.3435	0
Story2	K8	K8	K8	CENTROY	NonModHist	Min	I-End	-20.3379	0
Story2	K8	K8	K8	CENTROY	NonModHist	Min	J-End	-20.3379	0

Figura 63: Fuerzas máximas en los disipadores de energía.

Cuadro 17: Fuerza máxima del arreglo de los disipadores.

Disipador	Fuerza (ton)	Fuerza (kN)
máxima del arreglo de disipadores	145	1422

Rated Force (kN)	Suggested C Values in kN - (Sec/m)^(1/0.3) where F=C*(V)^0.3			
	Max vel = 0.127 m/s	Max vel = 0.254 m/s	Max vel = 0.381 m/s	Max vel = 0.508 m/s
250	454.6	369.2	326.9	299.9
500	909.1	738.4	653.8	599.8
750	1363.7	1107.6	980.8	899.7
1000	1818.2	1476.8	1307.7	1199.6
1500	2727.3	2215.3	1961.5	1799.3
2000	3636.4	2953.7	2615.4	2399.1
3000	5909.2	4799.7	4250.0	3898.6
4000	7438.1	6041.6	5349.7	4907.3
6500	11983.6	9733.7	8618.9	7906.2
8000	14876.2	12083.2	10699.3	9814.6

Figura 64: Fuerzas máximas en los disipadores de energía.

Con esta tabla se puede seleccionar un valor de un amortiguador estandarizado, para nuestro diseño se debe seleccionar uno con una capacidad de 1500 kN, En diseños más detallados se pueden hacer arreglos para reducir el tamaño de estos en función de la demanda del análisis.

5.10. Interacción del proceso hasta que cumpla según el AISC 7-16.

Este paso es necesario verificar que los elementos estructurales sean capaces de soportar las demandas a los que están sujetos, estos deben cumplir con los requisitos del AISC.

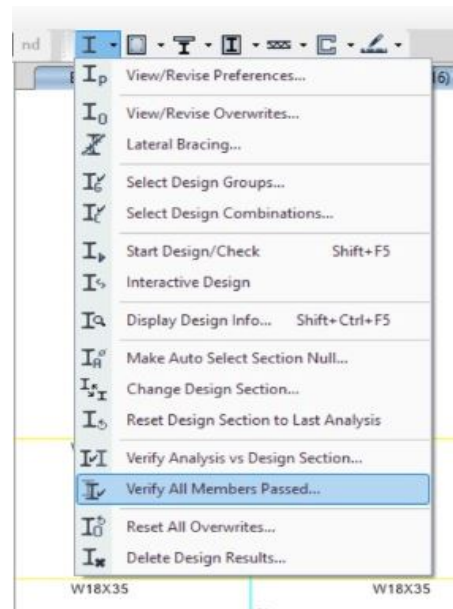


Figura 65: Fuerzas máximas en los disipadores de energía.

Para esto el programa es capaz de determinar qué elementos pueden de soportar las cargas a las cuales están sujetas, escoger los elementos que no cumplen y hasta dar detalles del diseño.

6.1. Reducción de derivas.

Comparando las derivas de la estructura en ambas direcciones en el caso crítico se pueden observar como estos dispositivos generan una reducción significativa tanto de forma gráfica como de forma numérica, en las figuras 66 y 67 se puede observar esta deriva por piso en ambas direcciones en ambos casos de análisis.

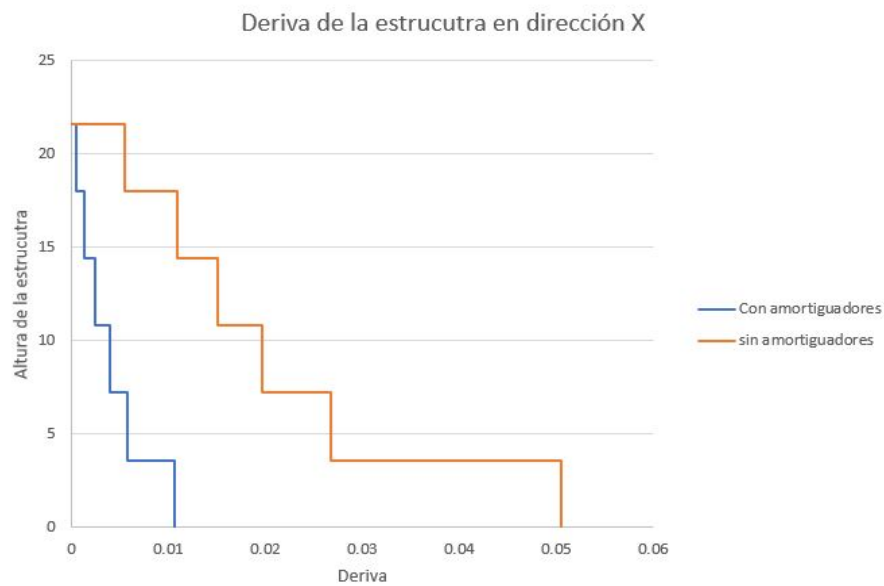


Figura 66: Reducción de derivas en dirección X de la estructura.

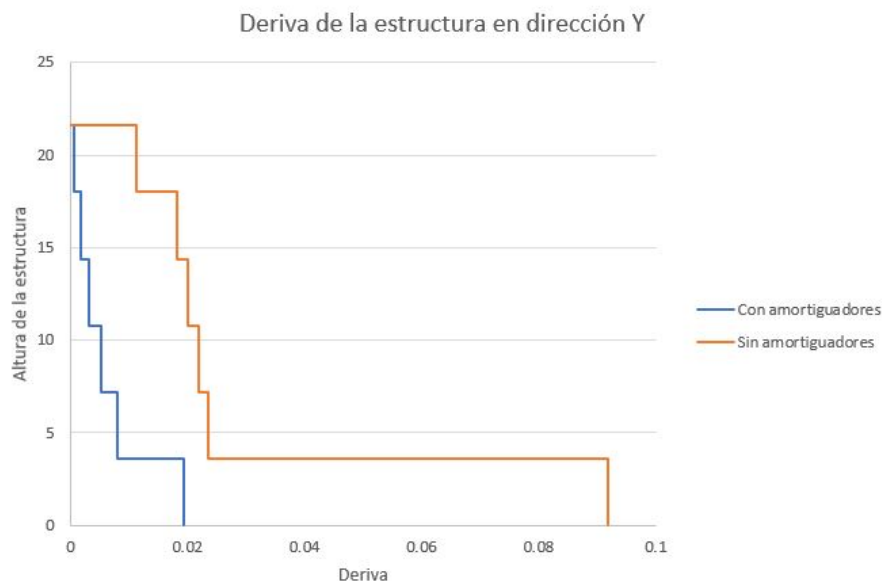


Figura 67: Reducción de derivas en dirección Y de la estructura.

Ambas figuras fueron de elaboración propia con los resultados de análisis de ETABS.

Cuadro 18: Reducción de derivas en dirección X de la estructura.

Piso	Amortiguado	Sin amortiguador	Requisito	Reducción (%)	Cumplimiento de norma
1	0.0107	0.0505	0.02	78.81	Cumple
2	0.00573	0.0267	0.02	78.54	Cumple
3	0.00391	0.0197	0.02	80.15	Cumple
4	0.00246	0.0151	0.02	83.71	Cumple
5	0.00216	0.0109	0.02	88.44	Cumple
6	0.000539	0.00547	0.02	90.15	Cumple
			Promedio	81.93	

Cuadro 19: Reducción de derivas en dirección Y de la estructura.

Piso	Amortiguado	Sin amortiguador	Requisito	Reducción (%)	Cumplimiento de norma
1	0.01942	0.0919	0.02	78.87	Cumple
2	0.00805	0.0235	0.02	65.74	Cumple
3	0.00526	0.0219	0.02	75.98	Cumple
4	0.00326	0.0201	0.02	83.78	Cumple
5	0.00169	0.0182	0.02	90.71	Cumple
6	0.00062	0.0112	0.02	94.46	Cumple
			Promedio	81.32	

Esta es la deriva de cada piso no la acumulada por eso tiene la forma escalonada que se reduce por piso. El primer piso es que tiene una mayor deriva en ambas direcciones y casos,

lo cual es normal por nuestro sistema de apoyo. Estas derivas son creíbles, en el caso de un sismo máximo; es decir, un sismo extremo para nuestras condiciones establecidas según las normas de seguridad estructural.

Con la aplicación de estos dispositivos se tiene que las derivas en promedio se redujeron hasta un 81% en ambas direcciones en el caso de estudio mas exigente. Estas nuevas derivas por norma hacen que la estructura cumpla los requisitos de las normas de seguridad estructural por lo cual en temas de deriva esta mas que satisfactorio.

Cuadro 20: Deriva en dirección X contra deriva objetivo según el límite de daño.

Piso	Amortiguado	Objetivo	Cumplimiento
1	0.0107	0.007	No
2	0.00573	0.007	Sí
3	0.00391	0.007	Sí
4	0.00246	0.007	Sí
5	0.00216	0.007	Sí
6	0.000539	0.007	Sí

Cuadro 21: Deriva en dirección Y contra deriva objetivo según el límite de daño.

Piso	Amortiguado	Objetivo	Cumplimiento
1	0.01942	0.007	No
2	0.00805	0.007	No
3	0.00526	0.007	Sí
4	0.00326	0.007	Sí
5	0.00169	0.007	Sí
6	0.00062	0.007	Sí

Sin embargo como se puede observar en los cuadros 20 y 21 contra la deriva objetiva para un daño moderado aun no se consigue en especial en el primer piso en ambas direcciones, para resolver esto se puede modificar los valores del amortiguador y aumentar sus capacidades donde es mas necesario, esto ya es criterio del diseñador.

Esto no significa que el diseño sea incorrecto ya que bajo el criterio de las normas cumple con las derivas, por lo cual ya es cuestión del diseñador si modificar las propiedades del disipador o su capacidad para llegar a cumplir la deriva del limite de daño.

6.2. Balance de energía del sistema.

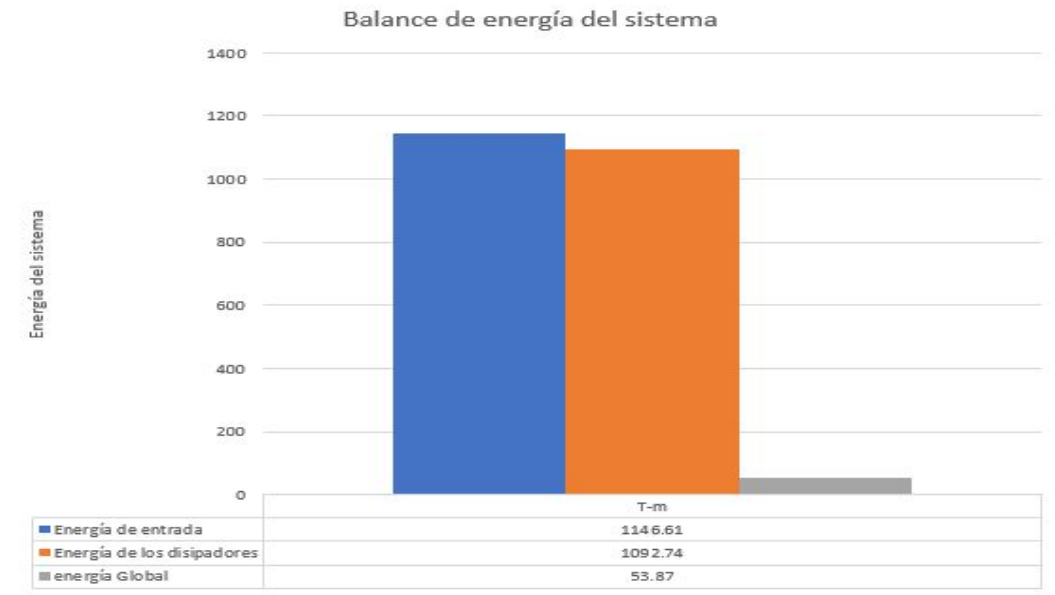


Figura 68: Balance de energía del sistema.

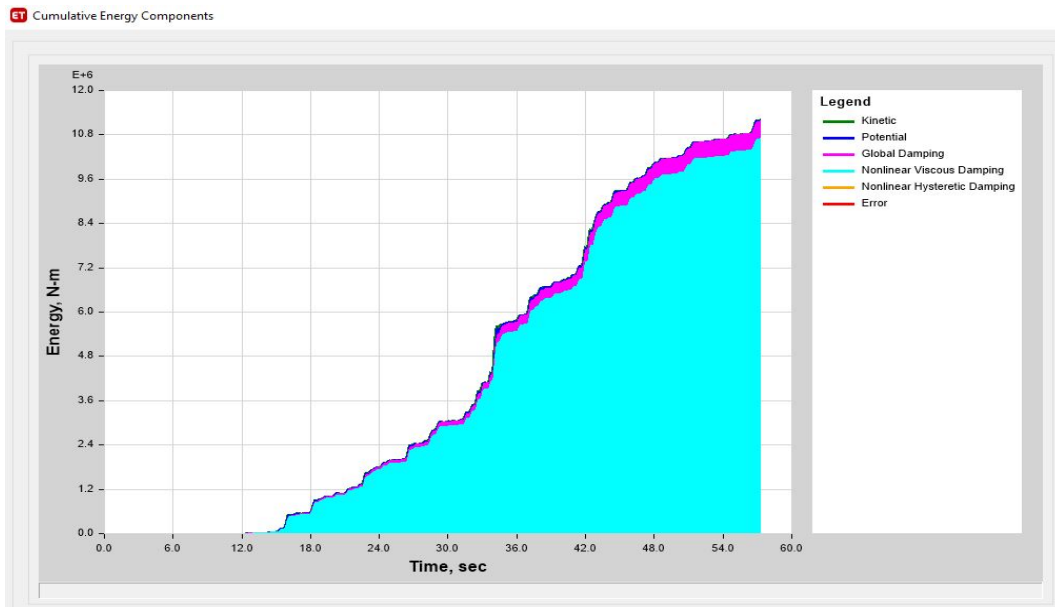


Figura 69: Gráfica de energía de ETABS.

Con la configuración actual de 18 dispositivos distribuidos en 6 por piso tenemos que estos llegan a absorber casi por completo la energía generada por los casos sísmicos teniendo que casi un 10% restante para que lo absorba la estructura.

6.2.1. Reducción de cortante sobre la estructura.



Figura 70: Fuerza cortante de la estructura.
[Elaboración propia.]

Cuadro 22: Reducción de fuerza cortante sobre la estructura.

Piso	Amortiguado (T)	Sin amortiguador (T)	Reducción (%)
1	916.44	1795.62	51.04
2	769.34	1620.44	47.48
3	637.96	1343.07	47.50
4	499.27	1065.69	46.85
5	360.58	759.12	47.50
6	221.89	408.73	54.29
			47.50

Como se puede observar en la Figura 70 se tiene una reducción en la fuerza cortante por piso esto quiere decir que con nuestro arreglo actual se pueden reducir en promedio un 47% las fuerzas cortantes que sufre la estructura principal.

6.3. Demanda contra capacidad de los elementos estructurales.

El software es capaz de realizar un análisis de demanda contra capacidad, este nos dirá si algún elemento no es capaz de soportar las condiciones de carga y sismo aplicadas.

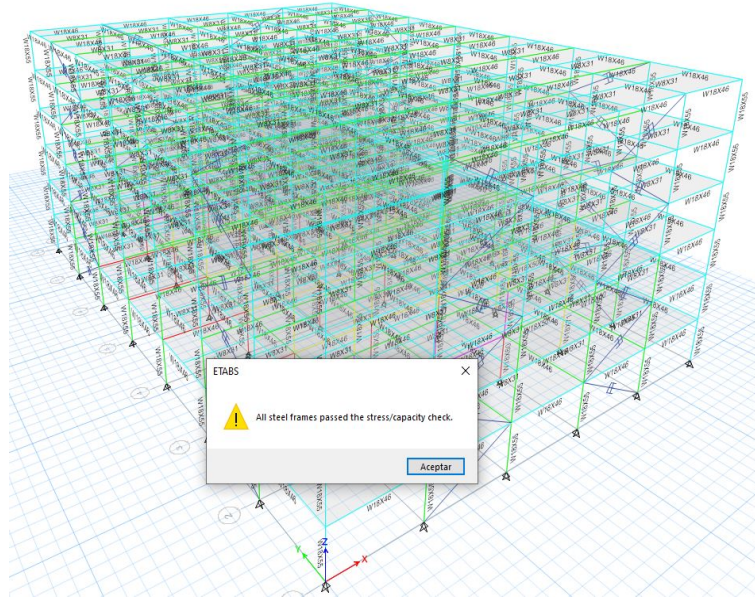


Figura 71: Verificación de elementos estructurales.

Luego se puede pedir un informe mas detallado de cada elemento para saber cosas como a relación entre demanda y capacidad, hasta que combinación de carga es la que ejerce mayores esfuerzos.

ETABS Steel Frame Design
AISC 360-16 Steel Section Check (Strength Summary)

Element Details

Level	Element	Unique Name	Location (m)	Combo	Element Type	Section	Classification
Story1	C20	48	3.14026	DSBS11	Ordinary Moment Frame	W18X60	Slender

LLRF and Demand/Capacity Ratio

L (m)	LLRF	Stress Ratio Limit
3.60000	0.4	0.95

Analysis and Design Parameters

Provision	Analysis	2nd Order	Reduction
LRFD	Direct Analysis	General 2nd Order	Tau-b Fixed

Stiffness Reduction Factors

$\alpha P_u / P_u$	$\alpha P_u / P_c$	T_u	EA factor	EI factor
0.582	0.548	0.972875	0.8	0.8

Design Code Parameters

Φ_c	Φ_t	Φ_{TV}	Φ_{L1}	Φ_{L2}	Φ_{V-10}	Φ_{VT}
0.9	0.9	0.9	0.75	0.9	1	1

Section Properties

A (m ²)	J (m ⁴)	I _{xx} (m ⁴)	I _{yy} (m ⁴)	A _{xx} (m ³)	A _{yy} (m ³)
0.0114	0.000001	0.00041	0.000021	0.0068	0.0049

Design Properties

S _{xx} (m ³)	S _{yy} (m ³)	Z _{xx} (m ³)	Z _{yy} (m ³)	r _{xx} (m)	r _{yy} (m)	C _x (m ⁴)
0.001772	0.000217	0.002016	0.000338	0.18992	0.04285	0

Material Properties

E (tonf/m ²)	f _y (tonf/m ²)	R _w	α
20369019.16	38153.48	1.1	NA

Stress Check forces and Moments

Location (m)	P _u (tonf)	M _{u1} (tonf-m)	M _{u2} (tonf-m)	V _{u1} (tonf)	V _{u2} (tonf)	T _u (tonf-m)
3.14026	-232.4807	-0.4385	-0.2609	0.1396	0.0831	0

Axial Force & Biaxial Moment Design Factors (H1-1a)

	L Factor	K ₁	K ₂	B ₁	B ₂	C _u
Major Bending	0.872	1	1	1	1	0.6
Minor Bending	0.872	1	1	1	1	0.6

Parameters for Lateral Torsion Buckling

L _{br}	K _{br}	C _{br}
0.872	1	1.867

Figura 72: Detalles del diseño del elemento Columna.

Estos informes generados automáticamente por el software nos dan un análisis de los elementos estructurales en estos resúmenes podemos ver la demanda contra capacidad en función de las combinaciones de carga que establecimos para el análisis. Esta es una forma rápida de ver las condiciones de los elementos para luego poder analizarlo de forma manual y verificar los resultados del software.

1. Se plantearon las directrices necesarias para realizar un análisis a los amortiguadores viscosos fluidos para riostras en acero.
2. Por medio del programa de SeismoSelect se pudo realizar una selección de registros de aceleración en base al espectro de respuesta para luego realizar el análisis tiempo historia,
3. El modelo fue analizado con el espectro de respuesta que es máximo creíble que estipulan las normas de seguridad guatemalteca.
4. Los disipadores fluidos viscosos generaron una disminución de las derivas en un promedio del 81 % en ambas direcciones con el caso más crítico.

Recomendaciones

1. Emplear acelerogramas del territorio nacional, así estos serán mas representativos de la realidad del suelo.
2. Respalda el análisis del software con el cálculo de los elementos de forma manual.
3. Realizar un análisis de tiempo historia no lineal.
4. Analizar el sistema con elementos como columnas cruciformes o HSS.
5. Evaluar el costo de una estructura convencional a una con estos dispositivos.
6. Analizar el comportamiento de los elementos y evaluar si se generan rotulas plásticas en el rango corto del espectro y así evaluar diferentes soluciones al sistema.
7. Generar una norma o estandarización para el territorio de Guatemala.

Bibliografía

-
- [1] H. Esp, “¿Qué son los SISMOS , dónde ocurren y cómo se miden?”, *Ciencia*, vol. 3, pág. 8, 2018.
 - [2] W. J. K. Y. R. I. Tilling, *This Dynamic Earth: the stroy of plate tectonics*, url: pubs.usgs.gov/gip/dynamic/dynamic.html el 3-02-2015]. 2014.
 - [3] M. Rodríguez, “TECTÓNICA DE PLACAS”, *Universidad Rafael Landivar*, vol. 2, 2013.
 - [4] R. de sismologia Nacional de Costa Rica, *¿Qué tipo de bordes de placas tectónicas existen?*, 2019.
 - [5] C. N. d. P. D. Desastres, *Sismos*, 5a. Fascículos, 2014, pág. 47, ISBN: 9706288767.
 - [6] L. G. C. M. y Jaime E. Requena F, *Mapeo Geologico de supercifie del Cuadrangulo Granados*, <https://digi.usac.edu.gt/bvirtual/informes/puirna/INF-2000-009.pdf>, (Accessed on 07/02/2020), mar. de 2001.
 - [7] INSIVUMEH, *MARCO TECTONICO PARA GUATEMALA – INSIVUMEH*, <https://insivumeh.gob.gt/destacados-portada/marco-tectonico-para-guatemala/>, (Accessed on 07/02/2020), sep. de 2019.
 - [8] L. M. Acevedo Castañeda, “Estabilización mecánica de suelos cohesivos a través de la utlizacion de material priclástico procedente del volcán de Pacaya”, *Universida San Carlos de Guatemala*, pág. 142, 2012.
 - [9] J. De La Colina Martínez y H. Ramírez de Alba, “Introducción a la ingeniería estructural”, 2000.
 - [10] R. C y P. O, *Diseño estructural*, ép. Tesis (Magister en Ingenieria Civil). Universidad de los Andes. Uniandes, 2014, ISBN: 9789561426634.
 - [11] C. Fernández y E. Alcaraz, *Ética para Ingenieros*, ép. Ingenieria y Ciencia Básicas. Grupo Editorial Patria, 2014, ISBN: 9786074389142.
 - [12] AGIES, “Normas de Seguridad Estructural para Guatemala: Demandas estructurales y condiciones de sitio.”, 2018.

- [13] J. Ambrose y D. Vergun, *Diseño Simplificado de Edificios Para Cargas de Viento y Sismo*, ép. Colección Textos Politécnicos. Serie Construcción. Noriega Editores, 2002, ISBN: 9789681857936.
- [14] R. A. Torres, *VULNERABILIDAD FÍSICA DE CUBIERTAS DE EDIFICACIONES DE USO DE OCUPACIÓN NORMAL ANTE CAÍDAS DE CENIZA EN LA ZONA DE INFLUENCIA DEL VOLCÁN GALERAS*, <https://www.redalyc.org/jatsRepo/3496/349651525005/html/index.html>, (Accessed on 06/29/2020), abril de 2017.
- [15] P. M. R., *Los sismos y su efecto sobre las estructuras*, <http://cmas.siu.buap.mx>, (Accessed on 06/29/2020), feb. de 2007.
- [16] AGIES, “NSE 5.1 Presas de tamaño y altura limitados”, pág. 58, 2018.
- [17] W. Díaz, “Acero como material estructural”, *Universidad politécnica Salesiana*, pág. 10, 2019.
- [18] R. B. Peck, *El acero como material estructural*, url: victoryepes.blogs.upv.es/2018/11/13/el-acero-como-material-estructural/, 2018.
- [19] C. Steel, *Acero Estructural, Al Carbono y Aleado | Chapel Steel*, <https://www.chapelsteel.com/es/a572.html>, (Accessed on 08/08/2020), 2018.
- [20] F. D. Del Castillo Rodriguez, “Perfiles estructurales”, *Universidad nacional autonoma de México*, pág. 32, 2019.
- [21] A. Diaco, *Catalogo de vigas*, 2019.
- [22] L. Rotondo y A. Barbat, *Diseño sismorresistente de edificios*. Reverté, 1999, ISBN: 9788429120110.
- [23] U. N. de Colombia, *SISTEMAS DE CONTROL PARA LA PROTECCIÓN DE ESTRUCTURAS CIVILES SOMETIDAS A CARGAS DINÁMICAS | GÓMEZ | DYNA*, (Accessed on 08/10/2020), 2010.
- [24] J.-s. Hwang, “Seismic Design of Structures with Viscous Dampers”, *National Taiwan University of Science and technology*, n.º October, pág. 16, 2014.
- [25] F. Naeim, *The Seismic Design Handbook*. Springer US, 2012, ISBN: 9781461516934.
- [26] MINSA, *Tecnología antisísmica : Disipadores Viscosos*, (Accessed on 07/01/2020), abril de 2016.
- [27] G. R. D. De Domenico, *Earthquake protection of structures with nonlinear viscous dampers optimized through an energy-based stochastic approach*, Departament of Engineering, University of Messina, (Accessed on 08/13/2020), Messina, Italia de 2019.
- [28] S. Youldash, M. O. F. Technology y S. Engineering, “SEISMIC BEHAVIOR OF REINFORCED CONCRETE BUILDINGS UNDER VARYING FREQUENCY CONTENTS”, n.º May, 2014.
- [29] D. o. H. s. f. E. M. Agency, “Hazus –MH 2.1”, *Mitigation Division*, pág. 860, 2013.
- [30] ACI, *ACI 318-14 Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary*, <http://aghababaie.usc.ac.ir/files/1506505203365.pdf>, (Accessed on 09/21/2020), 2014.

- [31] M. A. J. Eduardo Reinoso, *Criterios para obtener acelerogramas de diseño en sitios afectados por varias fuentes sísmicas usando como ejemplo el caso de terreno firme de la Ciudad de Mexico*, <http://www.scielo.org.mx>, (Accessed on 09/24/2020), Diciembre de 2009.
- [32] M. Borrero, *Estimación de la variabilidad de la deriva y del cortante basal resistente de pórticos de concreto reforzado en Bogotá*. <https://repository.javeriana.edu.co>, (Accessed on 09/24/2020).
- [33] R. Hibbeler, *Mecánica de Materiales*. Pearson Educación, 2006, ISBN: 9789702606543.
- [34] G. Clement, *Estructuras de acero. Introducción al diseño*. Univ. Nacional de Colombia, ISBN: 9789587017588.

10.1. Glosario

1. Acelerograma: Es una representación temporal de la aceleración que experimenta el suelo en un determinado punto durante un terremoto. [31]
2. Deriva: Es la relación entre el desplazamiento lateral máximo en un piso o la altura total del edificio dividido por la altura.[32]
3. Curva de histéresis: Es una representación gráfica de la energía disipada por ciclo, esta tiene la energía almacenada durante el ciclo de carga y la energía elástica recuperada durante el ciclo de descarga. [33]
4. Riostras: Elemento estructural metálico o de madera empleado para mantener la posición o reforzar marcos estructurales. [34]

