

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE CIVIL

**DISERTACIÓN PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO
CIVIL**

**“GENERACIÓN DE MODELOS MATEMÁTICOS BÁSICOS DE
AISLAMIENTO SÍSMICO DE BASE DE TERCERA GENERACIÓN”**

BERNARDO MEDINA

QUITO, 2022

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado a mi familia y amigos quienes desde el inicio de la carrera hasta su culminación estuvieron presentes y creyeron en mi sin dudar un solo momento.

AGRADECIMIENTOS

Primero agradecer a Dios quien es el que ha hecho posible absolutamente todo, a mis padres que han estado apoyándome siempre, a mis hermanas quienes siempre me han brindado su positivismo para seguir adelante. Como olvidar de mi familia y amigos, que estoy seguro que se alegrarán al ver mi trabajo finalizado.

ÍNDICE

CAPITULO 1: GENERALIDADES	11
1.1 Resumen.....	11
1.2 Abstract.....	12
1.3 Justificación	13
1.4 Planteamiento del problema.....	13
1.5 Objetivos	14
1.5.1 General	14
1.5.2 Específicos.....	14
1.6 Marco teórico y conceptual.....	14
1.6.1 Antecedentes	14
1.7 Alcance.....	15
1.8 Hipótesis.....	15
1.9 Operacionalización de la investigación.....	15
1.10 Procedimiento	16
CAPITULO 2: MARCO TEÓRICO.....	17
2.4 Parámetros considerados para el Análisis Modal Espectral.....	20
2.6 Sistema Estructural	23
2.6.4 Elementos de componentes estructurales y no estructurales.....	23
2.7 Propiedades del sistema de aislamiento	24
2.7.1 Propiedades del sistema de aislamiento en el desplazamiento máximo.....	24
2.8 Criterios sísmicos de movimiento de tierra.....	24
2.9 Análisis Estático Equivalente.....	25
2.12 Fuerzas laterales mínimas para el diseño	27
2.12.2 Elementos estructurales por encima del nivel base	27
2.13 Límites de deriva.....	28
2.14 Procedimientos de Análisis Dinámico	28
CAPÍTULO 3: CÁLCULOS.....	31
3. Descripción de la Estructura.....	31
3.2 Análisis Modal Espectral de la estructura propuesta	33
3.2.1 Espectro de respuesta elástico de aceleraciones (S_a)	33
3.2.2 Análisis Inelástico	33
3.2.3 Coeficiente de regularidad en planta Φ_p	34
3.2.4 Coeficiente de reducción de resistencia (R).....	34

3.2.5	Curva de espectro inelástico, estructura empotrada	34
3.3	Límites permisibles de deriva inelástica de los pisos, estructura empotrada.....	35
3.3.1	Cortante inelástico debido a TR475, estructura empotrada	36
3.3.2	Desplazamientos inelásticos debido a TR475, estructura empotrada	36
3.3.3	Torsión debido a TR475, estructura empotrada	37
3.4	Selección de señales, estructura empotrada	37
3.4.2	Onda de Corte a los 30 metros (Vs)	39
3.5	Registros.....	40
3.7	Análisis Tiempo – Historia, estructura empotrada.....	44
3.8	Aislador Triple Péndulo (FPT)	47
3.9	Datos del Fabricante.....	48
3.11	Curva de Histéresis del Aislador FPT15656R/16-12R/12-7.....	49
3.12	Cálculo de la Rigidez Efectiva (k_M).....	68
3.12.1	Energía de Disipación (E_M).....	69
3.12.2	Amortiguamiento Efectivo (β_M).....	70
3.12.3	Peso Efectivo de la Estructura.....	71
3.13	Curva del espectro de respuesta modal reducida	72
3.14	Modelo matemático para la generación de la curva de histéresis en Matlab	74
3.16	Aisladores a analizar	76
3.20	Análisis Tiempo Historia: Base aislada Modelo 1	84
3.20.2	Registros Estructura Aislada Modelo 1	85
3.22	Análisis Tiempo Historia: Base aislada Modelo 2.....	90
3.23.1	Registros Estructura Aislada Modelo 2.....	92
3.25	Análisis Tiempo Historia: Base aislada Modelo 3.....	97
3.25.2	Registros Estructura Aislada Modelo 3.....	99
	CAPÍTULO 4: ANÁLISIS COMPARATIVO	105
4.	Análisis comparativo.....	105
4.1	Análisis de Derivas inelásticas.....	105
4.2	Análisis de Fuerza Cortante Inelástica.....	105
4.3	Análisis de Desplazamiento Inelástico	106
4.5	Variación Porcentual de Resultados	108
4.5.1	Variación Porcentual de Deriva Inelástica	108
4.5.2	Variación Porcentual de Cortante Inelástico	109
4.5.3	Variación Porcentual de Desplazamiento Inelástico	110

Capítulo 5: CONCLUSIONES	111
1. Conclusiones.....	111
1.1 Modelo 1	112
1.2 Modelo 2	112
1.3 Modelo 3	112
1.4 Recomendaciones.....	112
2. BIBLIOGRAFÍA	113
3. ANEXOS	116

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1.	Estructura piso 1 al 6.....	31
Fig. 2.	Estructura piso 7 al 10.....	32
Fig. 3.	Estructura Vista en 3D.....	32
Fig. 4.	Curva de espectro inelástico TR475 años.....	35
Fig. 5.	Deriva inelástica modelo inicial.....	35
Fig. 6.	Cortante debido a TR475.....	36
Fig. 7.	Desplazamientos debido a TR475.....	36
Fig. 8.	Torsión debido a TR475.....	37
Fig. 9.	Espectro NEC cargado en la página del PEER.....	38
Fig. 10.	Datos ingresados para la selección de registros.....	39
Fig. 11.	Registros Sísmicos, Componente [N, S] / TR475.....	41
Fig. 12.	Registros Sísmicos, Componente [E, W] / TR475.....	42
Fig. 13.	Registros Sísmicos, Componente [V] / TR475.....	43
Fig. 14.	Deriva, Análisis Tiempo Historia.....	44
Fig. 15.	Cortante, Análisis Tiempo Historia.....	45
Fig. 16.	Desplazamiento, Análisis Tiempo Historia.....	46
Fig. 17.	Torsión máxima, sentido x.....	46
Fig. 18.	Torsión máxima, sentido “y”.....	47
Fig. 19.	Vista en elevación del aislador.....	48
Fig. 20.	Vista en planta del aislador.....	48
Fig. 21.	Curva de Histéresis.....	50
Fig. 22.	Curva de Histéresis, etapa DBE.....	54
Fig. 23.	Curva de Histéresis, etapa MCE.....	57
Fig. 24.	Curva de histéresis, etapa 3.....	60
Fig. 25.	Curva de histéresis, etapa 4.....	63
Fig. 26.	Curva de histéresis, etapa 5.....	65
Fig. 27.	Fig. 23 Curva de histéresis, etapa 6.....	67
Fig. 28.	Curva de histéresis del aislador.....	68
Fig. 29.	Espectro de respuesta modal reducido.....	74
Fig. 30.	Datos de entrada en hoja de Excel.....	74
Fig. 31.	Curva de histéresis en Matlab – Aislador fabricante.....	76
Fig. 32.	Aislador 1, Modelo 1.....	77

Fig. 33.	Aislador 1, Modelo 1, Etapa 3	79
Fig. 34.	Curva de Histéresis, Aislador 1, Modelo 1	79
Fig. 35.	Aislador 2, Modelo 2	80
Fig. 36.	Curva de Histéresis, Aislador 2, Modelo 2, Etapa 3.....	81
Fig. 37.	Curva de Histéresis, Aislador 2, Modelo 2.....	81
Fig. 38.	Aislador 3, Modelo 3	82
Fig. 39.	Aislador 3, Modelo 3, Etapa 3	83
Fig. 40.	Curva de Histéresis, Aislador 3, Modelo 3.....	83
Fig. 41.	Espectro de aceleración estructura aislada Modelo 1	84
Fig. 42.	Espectro a ingresar al PEER, Modelo 1.....	85
Fig. 43.	Registros Sísmicos, Componente [N, S] / Modelo 1	86
Fig. 44.	Registros Sísmicos, Componente [E, W] / Modelo 1	87
Fig. 45.	Registros Sísmicos, Componente [V] / Modelo 1	88
Fig. 46.	Deriva, Análisis Tiempo Historia, Modelo 1.....	89
Fig. 47.	Cortante, Análisis Tiempo Historia, Modelo 1.....	90
Fig. 48.	Desplazamiento, Análisis Tiempo Historia, Modelo 1.....	90
Fig. 49.	Espectro de aceleración estructura aislada Modelo 2	91
Fig. 50.	Espectro a ingresar al PEER, Modelo 2.....	92
Fig. 51.	Registros Sísmicos, Componente [N, S] / Modelo 2	93
Fig. 52.	Registros Sísmicos, Componente [E, W] / Modelo 2	94
Fig. 53.	Registros Sísmicos, Componente [V] / Modelo 2	95
Fig. 54.	Deriva, Análisis Tiempo Historia, Modelo 2.....	96
Fig. 55.	Cortante, Análisis Tiempo Historia, Modelo 2.....	96
Fig. 56.	Desplazamiento, Análisis Tiempo Historia, Modelo 2.....	97
Fig. 57.	Espectro de aceleración estructura aislada Modelo 3	98
Fig. 58.	Espectro a ingresar al PEER, Modelo 3.....	99
Fig. 59.	Registros Sísmicos, Componente [N, S] / Modelo 3	100
Fig. 60.	Registros Sísmicos, Componente [E, W] / Modelo 3	101
Fig. 61.	Registros Sísmicos, Componente [V] / Modelo 3	102
Fig. 62.	Deriva, Análisis Tiempo Historia, Modelo.....	103
Fig. 63.	Cortante, Análisis Tiempo Historia, Modelo 3.....	103
Fig. 64.	Desplazamiento, Análisis Tiempo Historia, Modelo 3.....	104
Fig. 65.	Análisis Derivas, Modelo Empotrado y Modelos Aislados.....	105
Fig. 66.	Análisis Cortantes, Modelo Empotrado y Modelos Aislados.....	106

Fig. 67.	Análisis Desplazamientos, Modelo Empotrado y Modelos Aislados.....	106
Fig. 68.	Muestra Aleatoria de Registros (2) utilizados en el análisis.....	107
Fig. 69.	Comparación de Variaciones Porcentuales de Deriva, Modelo Empotrado vs. Modelos Aislados	108
Fig. 70.	Comparación de Variaciones Porcentuales de Cortante, Modelo Empotrado vs. Modelos Aislados	109
Fig. 71.	Comparación de Variaciones Porcentuales de Desplazamiento, Modelo Empotrado vs. Modelos Aislados.....	110

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Propiedades promedio del aislador	49
Tabla 2.	Propiedades individuales del aislador.....	49
Tabla 3.	Datos iniciales proporcionados por el fabricante.....	51
Tabla 4.	Datos procesados por el fabricante	51
Tabla 5.	Rigidez Efectiva.....	69
Tabla 6.	Energía de Disipación.....	70
Tabla 7.	Amortiguamiento Efectivo	71
Tabla 8.	Peso efectivo ensayado del fabricante	72
Tabla 9.	Aislador 1, Modelo 1	78
Tabla 10.	Aislador 2, Modelo 2	80
Tabla 11.	Aislador 3, Modelo 3	82

CAPITULO 1: GENERALIDADES

1.1 Resumen

La implementación de aisladores de base para mejorar la resiliencia de las estructuras es una opción muy interesante que ayuda a las edificaciones en su comportamiento frente la amenaza existente debido a los sismos. El Ecuador se encuentra en una zona con un alto riesgo sísmico debido a la configuración de las placas tectónicas que se encuentran por debajo de este territorio. En este documento se explica mediante un ejemplo cómo son las variaciones que tiene una estructura con aisladores en comparación a una estructura de base fija (empotrada) que comúnmente se construye en el Ecuador.

Sería de gran valor que en el Ecuador exista una guía que pueda regular y normar el uso de aisladores como tienen la mayoría de países Latinoamericanos, sin embargo, en esta investigación se ha utilizado el código ASCE 7-16 como guía base para todos los cálculos y limitaciones en el uso de los aisladores.

Adicionalmente, se ha utilizado la Norma Ecuatoriana de la Construcción para modelar las estructuras sobre la interfaz de aislamiento.

No se podría realizar una investigación de este tipo sin el uso de registros sísmicos, por lo que se ha recurrido a la base de datos de la Universidad de Berkeley, denominada PEER (Pacific Earthquake Engineering Research), para obtener registros que se ajusten a la curva de respuesta modal de aceleraciones espectrales, originada debido de las condiciones de la estructura y las condiciones de sitio en las cuales se acentuará la estructura tipo que se presentará en este documento.

Palabras clave: Aislador, Resiliencia, Registros Sísmicos, Placas Tectónicas

1.2 Abstract

The implementation of base isolators to improve the resilience of structures is a very interesting option that helps buildings in their behavior against the existing threat due to earthquakes. Ecuador is located in an area with a high seismic risk due to the configuration of the tectonic plates that are below this territory. This document explains through an example how are the variations that a structure with insulators has, compared to a structure with a fixed base (embedded) that is commonly built in Ecuador.

It would be of great value that in Ecuador there is a guide that can regulate and standardize the use of isolators as most Latin American countries have, however, in this research the ASCE 7-16 code has been used as a base guide for all calculations and limitations on the use of isolators.

Additionally, the “Norma Ecuatoriana de la Construcción” has been used to model the structures on the isolation interface.

An investigation of this type could not be carried out without the use of seismic records, so the University of Berkeley database, called PEER (Pacific Earthquake Engineering Research), has been used to obtain records that fit the modal response curve of spectral accelerations, originated due to the conditions of the structure and the site conditions in which the type structure that will be presented in this document will be accentuated.

Keywords: Isolator, Resilience, Seismic Records, Tectonic Plates.

1.3 Justificación

El Ecuador está localizado en las Costas Orientales del Océano Pacífico, por ende, pertenece al denominado “Cinturón de Fuego del Pacífico”. Esta zona en el mundo es caracterizada debido a su alta probabilidad de experimentar efectos de erupciones volcánicas y terremotos.

En las costas del país se produce un fenómeno de subducción debido a la interacción de la Placa de Nazca y Sudamericana, esto da lugar a la mayor cantidad de sismos que se registran en el territorio ecuatoriano. (Rivadeneira et al., 2007). Adicionalmente Ecuador posee un sistema de fallamiento intraplaca considerable, que deriva en alta sismicidad inclusive en las zonas de la Sierra y Oriente. (Beauval et al., 2018)

Por lo antes expuesto, se puede concluir que el país se encuentra en una zona de alta actividad sísmica local y regional. Adicionalmente, debido a las malas prácticas constructivas y la incorrecta estructuración sísmica de las edificaciones, la vulnerabilidad sísmica de las mencionadas estructuras en el Ecuador es alta. [(Aguirre & Gallegos, 2018), (Celi et al., 2017, 2018; Hynd et al., 2017)]

Además, es importante mencionar que la mayoría de las ciudades principales en Ecuador tienen una alta exposición puesto que se encuentran ubicadas sobre las fallas activas, un caso en conciso es la ciudad de Quito (Chicaiza Puchaicela, 2017), (Sosa et al., 2017).

La Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC Committee, 2014), exige distintos niveles de desempeño estructural para todos los tipos de edificaciones. Se debe entender que alcanzar niveles de resiliencia con base en desempeño no es una tarea fácil, si se emplea elementos estructurales principales diseñados para sufrir daño (configuraciones estructurales tradicionales) sin que estos elementos comprometan la funcionalidad del inmueble. Por las razones expuestas la implementación de sistemas de aislamiento sísmico son una buena alternativa.

En términos generales, para lograr una estructura resiliente (minimizar daños), se la deberá aislar o amortiguar. El uso de aislamiento sísmico permite que las aceleraciones provenientes del suelo debido al sismo no se transmitan en toda su magnitud a la estructura, por lo tanto, esta sufrirá menor daño y se logrará salvaguardar la vida y patrimonio de las personas.

1.4 Planteamiento del problema

Puesto que la mayoría de las ciudades ecuatorianas ya se encuentran construidas sobre ciertos sistemas de fallamiento geológico o cercanas a zonas de subducción. Y la amenaza sísmica es latente

y no controlable; en el único aspecto en el que se puede intervenir significativamente, es en disminuir la vulnerabilidad de las edificaciones.

Adicional a lo expuesto, Ecuador no tiene una normativa que regularice e implemente el uso de aisladores sísmicos en la construcción. Ni tampoco, genera incentivos para la amplia aplicación de los mismos.

1.5 Objetivos

1.5.1 General

Generar modelos básicos que emulen el comportamiento no lineal de un aislador de base de tercera generación.

1.5.2 Específicos

- ✓ Seleccionar una estructura que esté dentro del rango de operatividad de un aislador de tercera generación, con base en las recomendaciones de ([ASCE 7-16, 2017](#)).
- ✓ Seleccionar el tipo de suelo caracterizado por su onda de corte a los 30 metros.
- ✓ Seleccionar registros sísmicos de acuerdo con el periodo de la estructura y características geotectónicas predominantes en la Ciudad de Quito, con una amplificación en sitio correspondiente a suelo tipo C. La selección y escalamiento de señales se realizará con base en las recomendaciones de ([ASCE 7-16, 2017](#)), ([NEC Committee, 2014](#)),([PEER, 2020](#)).
- ✓ Modelar Linealmente la estructura seleccionada con base fija y analizarla en el tiempo con base en los registros sísmicos seleccionados.
- ✓ Generar los modelos básicos no lineales de los aisladores sísmicos de tercera de generación.
- ✓ Modelar Linealmente la estructura seleccionada con base aislada empleando los modelos básicos de aisladores de tercera generación y analizarla en el tiempo empleando los registros sísmicos seleccionados.
- ✓ Comparar los resultados de comportamiento global (derivadas, cortantes, etc.) del edificio de base fija vs los distintos modelos de base aislada.

1.6 Marco teórico y conceptual

1.6.1 Antecedentes

En el campo constructivo, la función de una estructura es brindar seguridad. Para ello, se debe cumplir regulaciones mínimas estructurales establecidas. En Ecuador, la Norma Ecuatoriana de la Construcción ([NEC Committee, 2014](#)), establece parámetros mínimos de estricto cumplimiento

que busca garantizar la seguridad de vida en las estructuras ante solicitaciones permanentes y eventuales (sismo). No obstante, queda a libertad del profesional el realizar análisis, diseño y construcción que vayan más allá de los parámetros mínimos establecidos.

Lamentablemente en el Ecuador la estructuración sísmica de edificaciones es deficiente, y en muchos casos ni siquiera se cumple la normativa estructural mínima (Celi & Arellano, 2014) (Celi et al., 2017). Lo cual quedó en evidencia el 16 de abril del 2016 cuando el país presenció un evento sísmico que puso en tela de duda a la calidad de estructuras existente. Como lo menciona (Aguirre & Gallegos, 2018) las estructuras fallaron principalmente debido a un análisis, diseño y proceso constructivo deficiente. Si se realiza un recuento general del desastre, las estructuras colapsaron principalmente a una incorrecta estructuración sísmica (Marrero et al., 2019).

Con estos antecedentes, se puede concluir que en Ecuador la filosofía de diseño sismorresistente es pobremente aplicada. Es decir, el nivel de vulnerabilidad sísmica de las ciudades ecuatorianas es de las más altas de la región. (Celi et al., 2018).

1.7 Alcance

Se realizará un análisis comparativo (cortantes, derivas, momentos, etc.), de una estructura de ocho pisos con área en planta de aproximadamente 600 m², modelado con base fija y tres modelos de base aislada (tercera generación). En todos los casos se realizará análisis dinámico lineal.

1.8 Hipótesis

Se propone la siguiente hipótesis:

“El nivel de respuesta estructural para la edificación con base asilada está directamente relacionado con la filosofía del modelamiento del aislador”

1.9 Operacionalización de la investigación

En este punto se debe hacer referencia a todos los aspectos vistos anteriormente en el plan para garantizar que el análisis comparativo que se realizará tendrá validez, corroborando que la implementación de aisladores en el proceso constructivo, desembocará en la aprobación y verificación de la hipótesis planteada, que “el nivel de respuesta estructural para la edificación con base asilada está directamente relacionado con la filosofía del modelamiento del aislador”, concluyendo que es necesaria la implementación de una normativa en el país que regule el uso de aisladores sísmicos en la construcción.

El uso de aisladores sísmicos no es obligatorio, pues no es la única alternativa para lograr resiliencia en estructuras esenciales. Sin embargo, resulta iluso pensar lograr resiliencia estructural con base en configuración estructural por capacidad y ductilidad únicamente sin que se sacrifique la operatividad del inmueble. Es decir, el empleo de mecanismos de disipación u amortiguamiento se vuelve una necesidad imperante para mantener el desempeño y operatividad de edificaciones esenciales; Ecuador no puede ser ajeno a esta realidad aún más cuando países vecinos con menor amenaza sísmica ya está migrando a normativas que regulen el uso de los mencionados mecanismos.

1.10 Procedimiento

El procedimiento de esta disertación se efectuará en la generación de un modelo de base fija y posteriormente tres modelos de base aislada. Todo esto se realizará en el software Etabs y posteriormente rutinas en el software Matlab que ayudarán a automatizar los procesos para un mejor manejo de la información.

Con la información y cálculos obtenidos se procederá a realizar el análisis comparativo con el fin de comprobar y verificar la hipótesis establecida en un inicio.

CAPITULO 2: MARCO TEÓRICO

2. Aisladores Sísmicos

Un aislador sísmico es un sistema que logra desacoplar a la estructura del terreno. Estos aisladores se encuentran ubicados en los puntos de interés de dicha estructura que, ante un evento sísmico, brindan a la misma la flexibilidad necesaria para diferenciar el periodo natural que se suscitará en la estructura, con el periodo natural del sismo, ayudando así en el nivel de resiliencia de la estructura. (Agudelo Zapata, 2014)

En las estructuras que cuenten con aisladores, es necesario realizar el análisis sísmico debido a dos eventos importantes. El primero para un sismo que tiene un periodo de retorno de 475 años que se lo denomina Sismo de Diseño, y el segundo para un periodo de 2500 años que se denomina Sismo Máximo Considerado.

Es importante considerar que el proyectista podría modificar los periodos de retorno de estos eventos sísmicos debido a la importancia que tenga la estructura, y también debido al grado de sismicidad que tenga la región en donde estará la estructura. (Aguar et al., 2014)

2.1 Aislador de Triple Péndulo (FPT)

El aislador es el primer elemento que recibe la energía del sismo. De acuerdo con (Fenz & Constantinou, 2008), el aislador de triple péndulo de fricción (FPT) está conformado por dos placas externas y dos placas internas, en total 4 placas cóncavas. Las propiedades geométricas del aislador están divididas en 12 componentes que son: La capacidad de deslizamiento, identificados como d_1 , d_2 , d_3 y d_4 , por otro lado, los radios de curvatura, siendo R_1 , R_2 , R_3 y R_4 ; además las alturas h_1 , h_2 , h_3 y h_4 . Las propiedades mecánicas del aislador son los coeficientes de fricción que son: μ_1 , μ_2 , μ_3 y μ_4 .

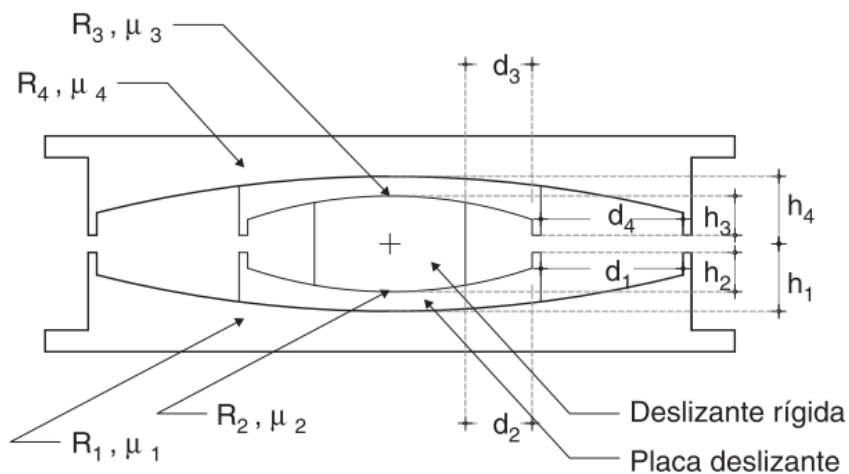


Fig. 1. Partes y Nomenclatura del Aislador FPT.

En esta investigación se emplearán aisladores FPT. Estos aisladores de péndulo de fricción funcionan como un mecanismo de péndulo invertido, por lo que el periodo de vibración va a depender directamente del radio de curvatura que tenga la superficie de su aislador. (Aguiar et al., 2014)

2.2 Onda de Corte

De acuerdo a (Lazcano, 2012), el momento que se genera un sismo, se producen ondas elásticas que recorren su trayecto por las rocas, sin embargo, cuando estas ondas se encuentran con depósitos de suelos que tienen menor densidad y rigidez, se genera el fenómeno de refracción. Dicho esto, las ondas sísmicas tienden a propagarse de una manera casi vertical por medio de los depósitos de suelo, hasta que finalmente llegan a la superficie. En esta trayectoria hacia la superficie, las ondas elásticas que atraviesan los suelos están gobernadas de manera importante por la velocidad de la onda de corte, por su símbolo (V_s). Es por esta razón la importancia de analizar la variación de la velocidad de onda de corte en su paso por los perfiles de suelo en donde se vaya a asentar la estructura.

2.2.1 Ondas Elásticas

Haciendo referencia a (Lazcano, 2012) las ondas elásticas son pequeñas perturbaciones mecánicas que se transmiten en los suelos, y su trayectoria no afecta las condiciones del medio por el cual esta viaja (el suelo).

Las ondas Elásticas se dividen en dos grupos, las ondas de Cuerpo, que son las que viajan en el interior del medio elástico, y las ondas de Superficie que se propagan a lo largo de la frontera de un medio semi-finito.

Las ondas de cuerpo se dividen en ondas de Compresión u ondas Primarias como generalmente se las conoce (V_P), y en ondas de Corte o Secundarias (V_s). Por otro lado, las ondas de superficie se subdividen en ondas Love y ondas Rayleigh.

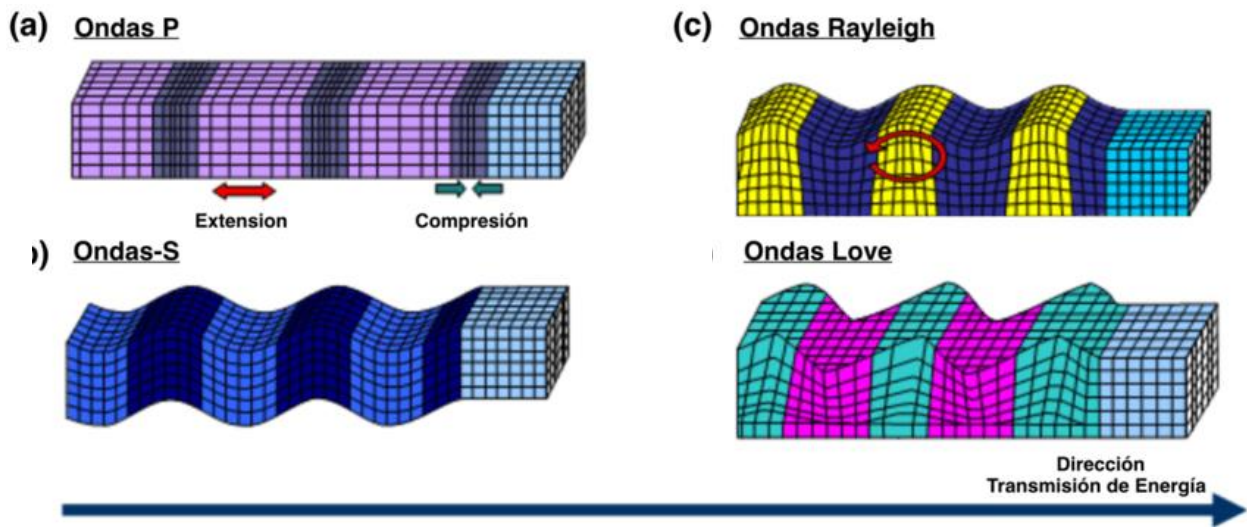


Fig. 2. Tipos de Ondas

Fuente: (Saenz, 2016)

2.2.2 Implicaciones de las ondas de Corte en las Estructuras

Haciendo referencia a (Tenesaca et al., 2017), a causa del sismo, grandes cantidades de energía son liberadas, esta energía es de carácter elástico debido a la relajación de esfuerzos que se propagan de manera interna y también hacia la superficie de la tierra.

La velocidad de onda de corte se verá influenciada por varios factores. Como primera consideración se tendría la manera en la que ocurren todas las manifestaciones ondulatorias. Por otro lado, se debe considerar también la densidad de los materiales por los cuales se propagará la onda.

De acuerdo a las especificaciones de la (NEC Committee, 2014), si se conoce la velocidad de onda de corte, se puede determinar el tipo de suelo existente, además también se puede conocer si las ondas sísmicas se amplificarán o no a través del suelo, esta última podría ser la que causa los daños en las estructuras, por lo que es de suma importancia tomar en cuenta este factor. (Tenesaca et al., 2017).

Tomando los conceptos de (Genatios & Lafuente, 2016), el diseño estructural es generado con base en el diseño, lo cual incluye los objetivos de desempeño. Debido a esto la estructura se comportará de la siguiente manera:

- Para sismos frecuentes, la estructura debe mantenerse intacta, esto quiere decir que no debería sufrir daños estructurales ni arquitectónicos.
- Para sismos intermedios que son poco frecuentes, la estructura podría sufrir daños, pero los mismos deberían ser reparables y la estructura debe conservar sus propiedades de operación.

Si se suscita un sismo severo, es admisible que la estructura sufra daños a tal punto que su operatividad pueda llegar a quedar nula. Sin embargo, no se permite que la estructura colapse. (Genatios & Lafuente, 2016)

2.3 Herramienta de Obtención de Registros Sísmicos

Una vez entendido cuales son las ondas que se propagan en el suelo, y cómo debe ser la respuesta de una estructura frente a estos estímulos, es necesario conocer cómo se pueden obtener los registros sísmicos que servirán para el análisis de la estructura propuesta en esta investigación.

2.3.1 Pacific Earthquake Engineering Research (PEER)

Para obtener los registros de los sismos se utilizó la base de datos de la Universidad de Berkeley que es un programa de investigación denominado “PEER”, que tiene como objetivo brindar datos, modelos y herramientas de software para respaldar una metodología formalizada de ingeniería sísmica basada en el rendimiento.

La investigación del PEER actualmente se centra en cuatro ejes, que son sistemas de construcción, sistemas de puentes y transporte, sistemas de líneas de vida y tecnologías de la información en apoyo de la implementación de la metodología.

2.3.2 Ajuste de registros a la curva de respuesta modal de la estructura

La base de datos del PEER abarca una gran cantidad de registros sísmicos que suceden todos los días en la tierra, es por esta razón que es necesario ingresar los datos que servirán para el análisis de la estructura que se estudiará en este documento. Para esto es fundamental tener en cuenta las condiciones del suelo y de la estructura para generar la curva de respuesta modal. Para esto se aplicarán los conceptos de la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC).

2.4 Parámetros considerados para el Análisis Modal Espectral

De acuerdo a los conceptos de (NEC Committee, 2014), en esta sección 2.3.3 se mostrará cuáles son los parámetros que se deben cumplir para generar la curva de respuesta modal, misma que servirá para ingresar en la página del PEER y obtener los registros necesarios para su posterior análisis.

2.4.1 Factor de zona (Z)

Dado que la estructura estará ubicada en la ciudad de Quito (Zona Sísmica 5) el factor de zona ‘z’ que representa la aceleración máxima en roca esperada para el sismo de diseño será igual a 0.40.

De acuerdo a la Tabla 1 de la Norma Ecuatoriana de la Construcción, Capítulo de Peligro Sísmico, señala que la caracterización del peligro sísmico de acuerdo a la zona y al factor z, es Alta.

2.4.2 Coeficiente de amplificación de suelo en la zona de período corto (F_a)

Para la determinar el valor de este factor, se utilizó la Tabla 3 de (NEC Committee, 2014) en la cual hay que considerar el tipo de perfil de suelo y la zona sísmica en donde estará ubicada la estructura. Para este caso debido a que se tiene un perfil de suelo c (Tabla 2 de la NEC, Cap. Peligro Sísmico), el valor de F_a es igual a 1.2.

2.4.3 Coeficiente de amplificación de suelo (F_d)

Para la determinar el valor de este factor, se utilizó la Tabla 4 de (NEC Committee, 2014), de igual manera se debe utilizar el tipo de perfil de suelo y el valor z de la zona sísmica. Se observa que el valor de F_d es igual a 1.11.

2.4.4 Comportamiento no lineal de los suelos (F_s)

Para la determinar el valor de este factor, se utilizó la Tabla 5 de (NEC Committee, 2014), se debe utilizar el mismo procedimiento que se realizó para determinar los factores anteriores. Se observa que el valor de F_s es igual a 1.11.

2.4.5 Razón entre la aceleración espectral y el PGA (n)

Con referencia a (NEC Committee, 2014) se especifica que, para provincias de la Sierra, Esmeraldas y Galápagos, el valor de n será de 2.48.

2.4.6 Período límite de vibración T_o y T_c

Son los períodos límites que representan el sismo de diseño.

Para el cálculo de estos períodos se utilizan las siguientes fórmulas:

$$T_o = 0.1 * F_s \frac{F_d}{F_a}$$

$$T_c = 0.55 * F_s \frac{F_d}{F_a}$$

Una vez que se tenga la curva de espectro de respuesta modal, se la debe ingresar a la página del PEER y posteriormente obtener los registros.

2.5 Normativa de análisis empleada

Dado que en el Ecuador no se tiene una normativa que controle el uso e implementación de aisladores sísmicos de base, se hizo referencia al Código Estadounidense ([ASCE 7-16, 2017](#)), por sus siglas en inglés (American Society of Civil Engineering) en su versión 7-16. En las secciones 2.4 hasta la sección 2.14 se mostrarán los conceptos y fórmulas empleadas en esta investigación, en base a la normativa antes mencionada.

2.5.1 Requisitos Generales de Diseño

Se debe considerar que el sistema de aislamiento debe contar con requisitos para condiciones ambientales que pongan a prueba el material del que está hecho el aislador como por ejemplo exposición a humedad, sustancias dañinas, de igual manera fluencia, fatiga, efectos de envejecimiento. ([ASCE 7-16, 2017](#))

Es importante mencionar que las estructuras que cuenten con un sistema de aislamiento deben resistir cargas de diseño de viento en todos los niveles, en la interfaz de aislamiento debe existir un sistema de restricción de viento que restrinja el desplazamiento lateral de la estructura que será causado por las cargas de viento laterales antes mencionadas.

De acuerdo con ([ASCE 7-16, 2017](#)), el sistema de aislamiento debe estar diseñado para cumplir con los requerimientos de aislamiento de límite superior e inferior, para producir una fuerza de restitución de tal manera que la fuerza lateral produzca un desplazamiento máximo correspondiente de al menos $0.025W$ veces mayor a la mitad del desplazamiento máximo correspondiente.

El sistema de aislamiento no debe ser diseñado para tener restricción de desplazamiento que limite el desplazamiento lateral causado por un sismo de diseño máximo considerado, sino ser diseñado teniendo algunas consideraciones:

- En cuanto a la capacidad última del sistema de aislamiento y los elementos estructurales que se encuentren debajo de dicho sistema, las demandas de fuerza y desplazamiento deben exceder a las demandas del sismo máximo de diseño considerado MCE_R .
- Se deben verificar las demandas de estabilidad y ductilidad de la estructura que se encuentra por encima del sistema de aislamiento.

- El desplazamiento no se considera efectivo si dicho desplazamiento es menor a 0.6 veces el desplazamiento máximo total.

2.6 Sistema Estructural

2.6.1 Distribución horizontal de la fuerza

Se debe presentar continuidad en el diafragma y todos los elementos de la estructura por encima del sistema de aislamiento, además deben tener resistencia y ductilidad adecuadas para transmitir las fuerzas de una parte de la estructura a otra.

2.6.2 Separaciones mínimas entre construcciones

Es importante conocer que las separaciones mínimas entre la estructura aislada y los muros a su alrededor u otras construcciones fijas no deberán ser inferiores al desplazamiento máximo total.

2.6.3 Conexiones del sistema de aislamiento

Se debe cumplir que las conexiones de los sistemas de aislamiento cumplan con los requisitos para marcos de momento de acero ordinarios que se muestran en el código ([American Institute of Steel Construction, 2016](#)) en las secciones E1.6a y E1.6b.

2.6.4 Elementos de componentes estructurales y no estructurales

Todas las partes de una estructura aislada, tanto los componentes estructurales como no estructurales deben estar diseñados para resistir fuerzas sísmicas y desplazamientos producidos por dichas fuerzas sísmicas.

2.6.5 Componentes en o sobre la interfaz de aislamiento

Los elementos de estructuras aisladas sísmicamente y los componentes no estructurales o porciones de la estructura que se encuentran sobre la interfaz de aislamiento, deben estar diseñadas para resistir una fuerza lateral sísmica igual a la respuesta dinámica máxima del elemento o componente que se encuentre en consideración usando un análisis de respuesta histórico, esto quiere decir, diseñar con el sismo máximo considerado (MCE).

2.6.6 Efectos de carga sísmica y combinaciones de carga

Los elementos de estructuras aisladas sísmicamente y los componentes no estructurales o porciones de la estructura que se encuentran sobre la interfaz de aislamiento, deben estar diseñadas para resistir una fuerza lateral sísmica igual a la respuesta dinámica máxima del elemento o componente que se encuentre en consideración usando un análisis de respuesta histórico.

2.7 Propiedades del sistema de aislamiento

Las propiedades nominales de diseño se basarán en las propiedades promedio durante los tres ciclos de prueba del prototipo del aislador.

2.7.1 Propiedades del sistema de aislamiento en el desplazamiento máximo

De acuerdo con (ASCE 7-16, 2017), la rigidez efectiva k_M del sistema de aislamiento en el desplazamiento máximo se calculará usando tanto los límites superiores como inferiores del comportamiento de la fuerza de deflexión. A continuación, se presenta la fórmula de la rigidez efectiva considerando los parámetros antes mencionados:

$$k_M = \frac{\sum |F_M^+| + |F_M^-|}{2D_M}$$

Siguiendo con los conceptos de (ASCE 7-16, 2017), el amortiguamiento efectivo β_M del sistema de aislamiento en el desplazamiento máximo (en pulgadas) se calculará usando tanto los límites superiores como inferiores del comportamiento de la fuerza de deflexión. A continuación, se presenta la fórmula del amortiguamiento efectivo considerando los parámetros antes mencionados:

$$\beta_M = \frac{\sum E_M}{2\pi k_M D_M^2}$$

Donde:

$\sum E_M$ = Energía total disipada en kips*in, en un ciclo de respuesta en el D_M .

$\sum F_M^+$ = Sumatoria de todas las unidades de aisladores del valor absoluto de la fuerza en kips, en un desplazamiento positivo igual a D_M .

$\sum F_M^-$ = Sumatoria de todas las unidades de aisladores del valor absoluto de la fuerza en kips, en un desplazamiento negativo igual a D_M .

2.8 Criterios sísmicos de movimiento de tierra

2.8.1 Registros de movimiento de tierras.

Referenciando a (ASCE 7-16, 2017), cuando se usan procedimientos de análisis de respuesta histórica, los movimientos de tierra MCE_R deben consistir en no menos de siete pares de componentes de aceleración horizontal debidamente seleccionados y escalados por registros individuales que

tengan distancias de falla y mecanismos de origen que sean consistentes con los que controlan el MCE_R .

Para cada par de componentes horizontales de movimientos de tierra, se construirá un espectro utilizando el método de la raíz de la suma de cuadrados (SRSS), tomando el 5% de amortiguamiento de la respuesta del espectro escalado.

Cada par de movimiento deberá ser escalado tal que en el rango de $0.75T_M$ y $1.25T_M$, el promedio del espectro de la suma de la raíz de cuadrados (SRSS) de todos los pares de componentes horizontales, no será menor que la ordenada correspondiente al espectro utilizando en el diseño del MCE_R .

2.9 Análisis Estático Equivalente

2.9.1 Desplazamientos laterales mínimos requeridos para el diseño

2.9.1.1 Desplazamiento Máximo

Aplicando los conceptos de (ASCE 7-16, 2017) se extrae que, el sistema de aislamiento debe estar diseñado para resistir como mínimo, el desplazamiento máximo (D_M), teniendo en cuenta que este desplazamiento se lo determina usando propiedades de límite superior e inferior en la dirección más crítica de respuesta horizontal.

$$D_M = \frac{gS_{M1}T_M}{4\pi^2B_M}$$

Donde:

g = Aceleración de la gravedad

S_{M1} Parámetro de aceleración espectral a un amortiguamiento del 5% del sismo MCE_R , en un período de 1 segundo.

T_M = Período efectivo en segundos de la estructura sísmicamente aislada a un desplazamiento D_M .

B_M = Coeficiente determinado en la tabla 17.5-1 del código (ASCE 7-16, 2017)

2.10 Amortiguamiento

Tomando en cuenta lo que explica (Castro, 2017), al emplear aisladores en estructuras, esto quiere decir que el período aumentará, por lo que períodos prolongados implican un incremento en la demanda de desplazamiento. Sin embargo, el aumento del amortiguamiento resulta en una reducción

de desplazamientos. En el (ASCE 7-16, 2017) se puede identificar que el amortiguamiento es calibrado con el desplazamiento, por lo que se presenta la siguiente tabla proporcionada por el código, en donde los valores de amortiguamiento efectivo (β), son asociados con el coeficiente de reducción de desplazamiento (B).

A continuación, se presenta la tabla del código (ASCE 7-16, 2017)

Table 17.5-1 Damping Factor, B_M

Effective Damping, β_M (percentage of critical) ^{a,b}	B_M Factor
≤ 2	0.8
5	1.0
10	1.2
20	1.5
30	1.7
40	1.9
≥ 50	2.0

Fuente: (ASCE 7-16, 2017)

2.11 Período efectivo a un desplazamiento máximo

En conceptualización del código (ASCE 7-16, 2017), el período efectivo a un desplazamiento máximo (D_M) se calculará de la siguiente manera:

$$T_M = 2\pi \sqrt{\frac{W}{k_M * g}}$$

Donde:

W = Peso sísmico efectivo de la estructura por encima de la interfaz de aislamiento.

k_M = Rigidez efectiva del sistema de aislamiento a un desplazamiento máximo (D_M).

g = Aceleración de la gravedad

2.12 Fuerzas laterales mínimas para el diseño

2.12.1 Sistema de aislamiento y elementos estructurales por debajo del nivel base

En concordancia con lo expresado en el código (ASCE 7-16, 2017), el sistema de aislamiento, la cimentación y los elementos estructurales por debajo del nivel base deben ser diseñados para resistir al menos una fuerza sísmica lateral mínima (V_b).

$$V_b = K_M D_M$$

Donde:

k_M = Rigidez efectiva del sistema de aislamiento a un desplazamiento máximo (D_M).

D_M = Desplazamiento en el centro de rigidez del sistema de aislamiento en la dirección considerada.

NOTA: V_b no se deberá tomar menor a la fuerza máxima en el sistema de aislamiento en cualquier desplazamiento máximo D_M .

Las cargas de volcamiento en los elementos del sistema de aislamiento, la cimentación y los elementos estructurales por debajo del nivel base causadas por V_b deben ser basadas en la distribución vertical de la fuerza, excepto por la fuerza de diseño lateral sísmica no reducida (V_{st}), que se utilizará en lugar de V_s .

2.12.2 Elementos estructurales por encima del nivel base

La estructura por encima del nivel base se diseñará y construirá utilizando los requerimientos para estructuras no aisladas para una fuerza de corte V_s .

$$V_s = \frac{V_{st}}{R_I}$$

Donde:

R_I = Coeficiente relacionado al tipo de fuerza sísmica de resistencia del sistema de aislamiento.

V_{st} = Fuerza lateral sísmica de diseño no reducida o cortante en los elementos que se encuentran por encima del nivel base.

La fuerza sísmica lateral no reducida o cortante en los elementos por encima del sistema de aislamiento se calculará de la siguiente manera:

$$V_{st} = V_b \left(\frac{W_s}{W} \right)^{(1-2.5\beta m)}$$

Donde:

W = Peso sísmico efectivo de la estructura por encima de la interfaz de aislamiento.

W_s = Peso sísmico efectivo de la estructura por encima de la interfaz de aislamiento excluyendo el peso sísmico efectivo del nivel base.

2.13 Límites de deriva

De acuerdo a ([ASCE 7-16, 2017](#)), la deriva máxima de piso de la estructura sobre el sistema de aislamiento no excederá a 0.015h_{sx}. La deriva se calculará de la siguiente manera:

$$\delta_x = \frac{C_d \delta_{xe}}{I_e}$$

Donde:

δ_{xe} = Deflexión a una ubicación requerida determinada por un análisis elástico

I_e = Factor de importancia

C_d = Se tomará C_d igual a R_I.

2.14 Procedimientos de Análisis Dinámico

2.14.1 Sistema de aislamiento

El sistema de aislamiento se modelará cumpliendo los requisitos mostrados en el ([ASCE 7-16, 2017](#)), y son:

1. Distribución espacial de los aisladores.
2. Traslación en ambas direcciones horizontales y torsión de la estructura sobre la interfaz de aislamiento considerando la ubicación más desfavorable de la excentricidad de la masa.
3. Fuerzas de volcamiento y levantamiento en las unidades individuales de aislamiento.

4. Efectos de carga vertical, bilateral y/o la tasa de carga si las propiedades de la fuerza de deflexión del sistema de aislamiento son dependientes en uno más de estos atributos.

El desplazamiento máximo total D_{TM} a través del sistema de aislamiento se calculará usando un modelo de estructura aislada que incorpora las características no lineales de la fuerza de deflexión del sistema de aislamiento y el sistema sísmico de fuerza resistente.

2.14.2 Estructura Aislada

El desplazamiento máximo de cada piso puede ser calculado usando un modelo estático lineal de la estructura aislada.

2.14.2.1 Límites de Deriva

- Donde el análisis de espectro de respuesta es usado, la deriva de piso máxima de la estructura aislada sobre el sistema de aislamiento no deberá exceder $0.015h_{sx}$.
- Donde el análisis de espectro de respuesta es usado basado en las características de fuerza de deflexión de los elementos no lineales, la deriva de piso máxima de la estructura aislada sobre el sistema de aislamiento no deberá exceder $0.020h_{sx}$.
- Los efectos secundarios del desplazamiento máximo lateral de la estructura sobre el sistema de aislamiento combinado con las fuerzas gravitacionales, deberá verificarse si la tasa de deriva de piso excede $0.010/R_I$.

2.15 Coeficientes de fricción

Haciendo referencia a (Fenz & Constantinou , 2008), el coeficiente de fricción en un aislador está influenciado por ciertos parámetros los cuales son:

- ✓ El material de la superficie de contacto.
- ✓ Las cargas verticales en la estructura: Esto quiere decir la presión en la superficie donde ocurrirá el desplazamiento. Dando como resultado que, a más presión vertical, el valor del coeficiente de fricción será menor.
- ✓ La velocidad de aplicación de la carga lateral: Esto implica que, a mayor velocidad de su aplicación, el coeficiente de fricción también incrementará.
- ✓ La temperatura que tenga el cojinete: Se debe tener en cuenta que, si el aislador tiene un incremento en su temperatura, esto quiere decir que el coeficiente de fricción será menor. Con esta afirmación se infiere que existe una relación entre la temperatura del cojinete con la

cantidad de ciclos durante el sismo, dando como resultado que, si hay mas ciclos, la temperatura del aislador igualmente incrementará.

CAPÍTULO 3: CÁLCULOS

3. Descripción de la Estructura

La estructura que se analizará en este trabajo estará compuesta de 10 niveles, con un área de construcción por piso en planta 843 m^2 , esta área es la misma para los niveles 1 hasta 6. Por otro lado, desde el piso 7 al piso 10 tiene un área en planta por piso de 681.27 m^2 .

La altura de entrepiso se divide de la siguiente manera:

Piso 1: 3.6m	Piso 4: 3.35m	Piso 7: 3.35m	Piso 10: 3.35m
Piso 2: 3.3m	Piso 5: 3.35m	Piso 8: 3.35m	
Piso 3: 3.4m	Piso 6: 3.35m	Piso 9: 3.35m	

Vista en planta, pisos 1 al 6

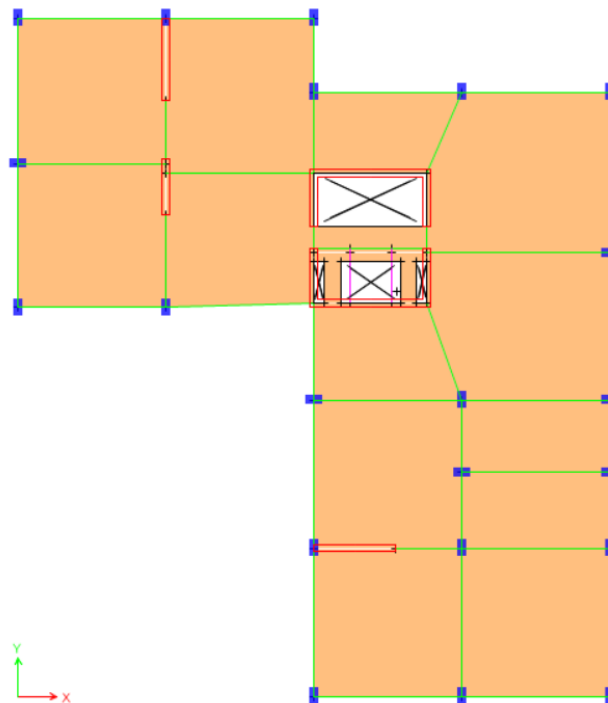


Fig. 3. Estructura piso 1 al 6

Vista en planta, pisos 7 al 10

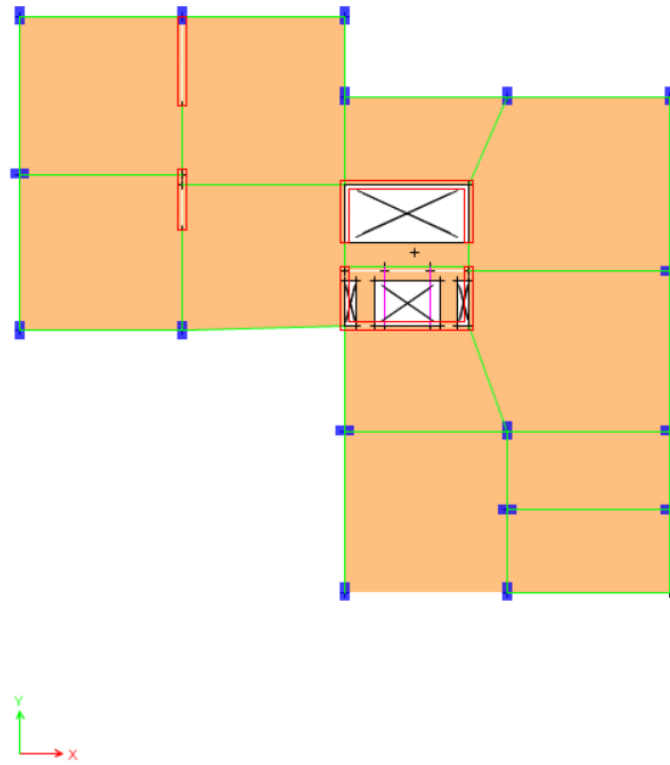


Fig. 4. Estructura piso 7 al 10

Vista en 3D de la estructura

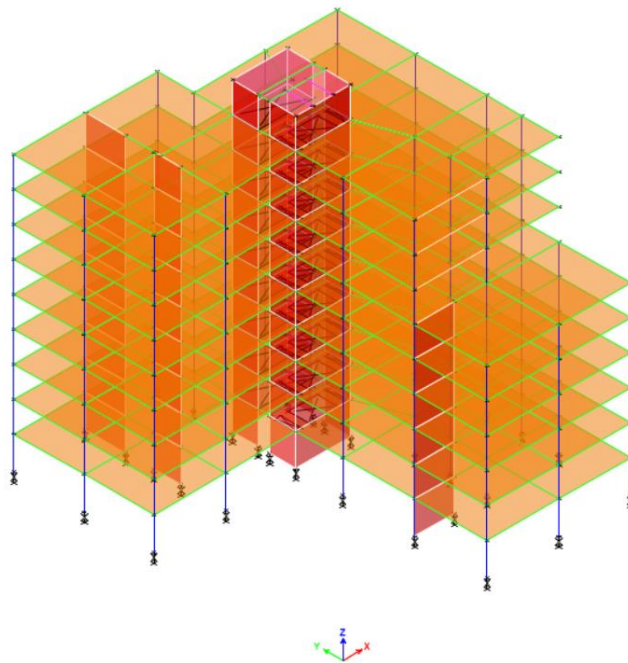


Fig. 5. Estructura Vista en 3D

3.2 Análisis Modal Espectral de la estructura propuesta

3.2.1 Espectro de respuesta elástico de aceleraciones (S_a)

El espectro de respuesta depende del período o modo de vibrar de la estructura.

Se debe tener en cuenta que el gráfico tiene dos secciones claramente identificadas, la meseta que se calcula con la siguiente expresión:

$$S_a = n * z * F_a$$

Esta fórmula es válida en los períodos de T_o y T_c .

Para la siguiente sección del espectro de respuesta (Períodos mayores a T_c), se calcula con la siguiente expresión:

$$S_a = n * z * F_a \left(\frac{T_c}{T} \right)^r$$

Se debe tener en cuenta que T es el período fundamental de la estructura, Además, para la determinar el valor de r , se hizo referencia a la NEC, Cap. Peligro Sísmico donde señala que, para todos los suelos, con excepción del suelo tipo E, se debe tomar un valor de r igual a 1. (NEC Committee, 2014)

3.2.2 Análisis Inelástico

Todo el análisis anterior fue realizado para la elaboración del espectro de respuesta elástico, sin embargo, el objetivo es trabajar con el espectro de respuesta inelástico, por esta razón se lo divide para una expresión en especial que se presenta a continuación. (NEC Committee, 2014)

$$R * \Phi_e * \Phi_p$$

Donde:

R = Coeficiente de reducción de resistencia

Φ_e = Coeficiente de regularidad en elevación.

Φ_p = Coeficiente de regularidad en planta

Coeficiente de regularidad en elevación Φ_e

Para determinar el coeficiente de regularidad en elevación Φ_e , se hizo referencia a la NEC, Cap. Peligro Sísmico donde señala que cuando una estructura no contemple ninguno de los tipos de irregularidades descritos en las tablas 13 y 14 de la misma norma, se considerará como una estructura regular en elevación, tomando un valor de $\Phi_e=1$. (NEC Committee, 2014)

3.2.3 Coeficiente de regularidad en planta Φ_p

Para determinar el coeficiente de regularidad en planta Φ_p , se hizo referencia a la Tabla 14 de la NEC, Cap. Peligro Sísmico donde la estructura analizada recae la irregularidad geométrica tipo 3, obteniendo un valor de $\Phi_p=0.9$. (NEC Committee, 2014)

3.2.4 Coeficiente de reducción de resistencia (R)

El valor de R utilizado para el cálculo fue de 6, sin embargo, si se hace referencia a la NEC, en la norma no existe ningún valor de 6, existen valores cercanos ya sean de 7, 8 o 5, pero ningún valor de la Tabla 15 de la NEC. Capítulo Peligro Sísmico menciona un valor de 6. Cabe recalcar que en Ecuador los métodos constructivos son bastante ineficientes, por lo que llegar a un valor de reducción de resistencia de 7 u 8 es divagar en nociones efímeras que no se cumplen en la realidad, por esta razón se ha escogido un coeficiente igual a 6, que ya es un valor alto y difícil de alcanzar, sin embargo, se ha considerado apropiado para los fines de investigación de este documento. (NEC Committee, 2014)

3.2.5 Curva de espectro inelástico, estructura empotrada

A continuación, se presenta la curva del espectro inelástico para un período de retorno de 475 años, considerando todos los parámetros anteriormente analizados

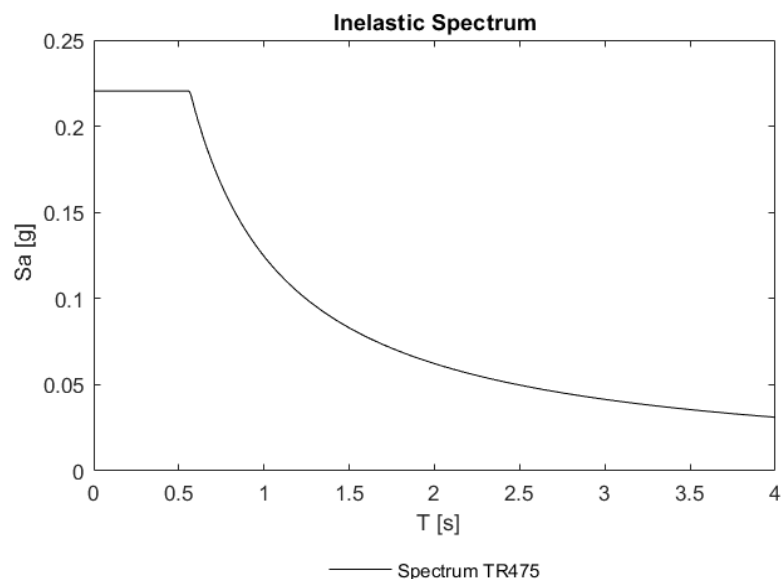


Fig. 6. Curva de espectro inelástico TR475 años

3.3 Límites permisibles de deriva inelástica de los pisos, estructura empotrada

La deriva máxima de piso no deberá exceder el 2% para estructuras de hormigón armado de acuerdo a la Tabla 7 de NEC, Capítulo Peligro Sísmico. A continuación, se presenta un diagrama con las derivas de piso de la estructura, es importante mencionar que todas las derivas están en los rangos permisibles de la norma. (NEC Committee, 2014)

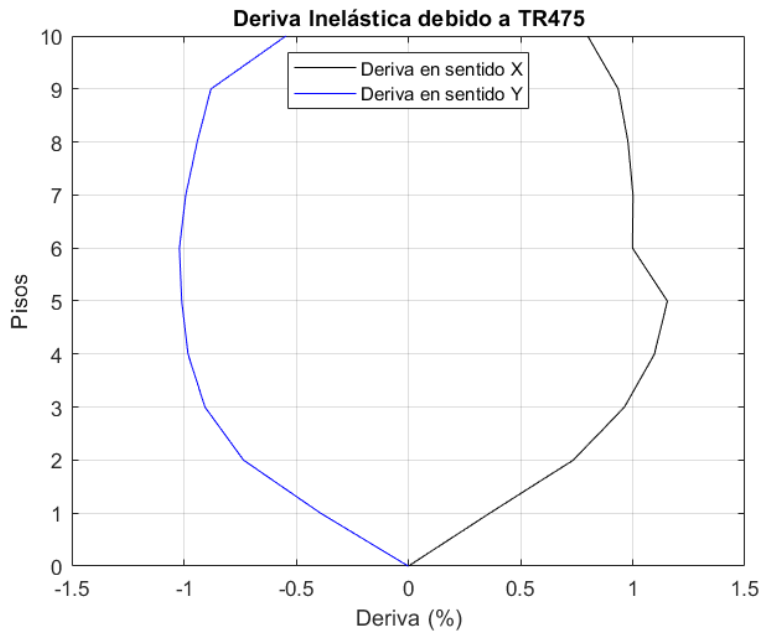


Fig. 7. Deriva inelástica modelo inicial

3.3.1 Cortante inelástico debido a TR475, estructura empotrada

A continuación, se presenta el diagrama con los cortantes generados en la estructura debido al espectro inelástico de TR475.

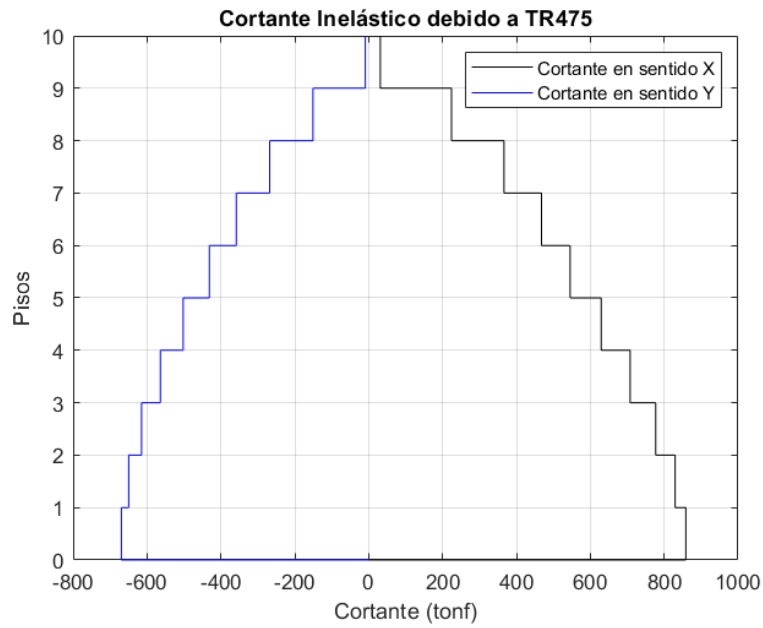


Fig. 8. Cortante debido a TR475

3.3.2 Desplazamientos inelásticos debido a TR475, estructura empotrada

A continuación, se presenta el diagrama con los desplazamientos generados en la estructura debido al espectro inelástico de TR475.

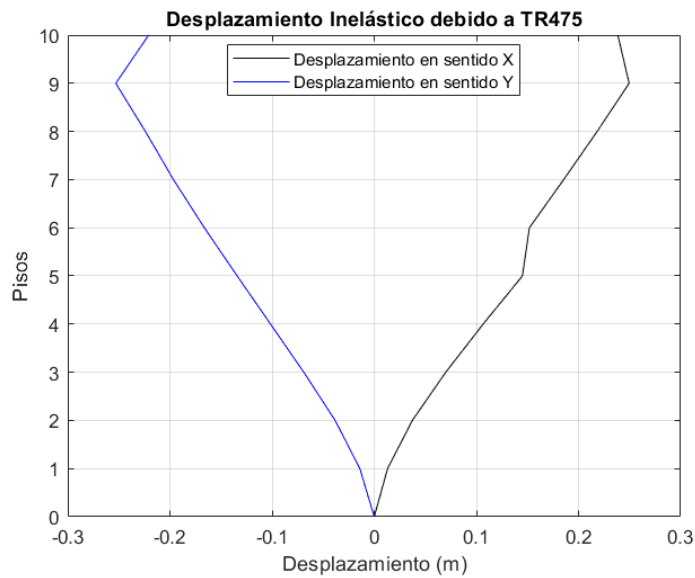


Fig. 9. Desplazamientos debido a TR475

3.3.3 Torsión debido a TR475, estructura empotrada

A continuación, se presenta el diagrama con las torsiones generadas en la estructura debido al espectro inelástico de TR475.

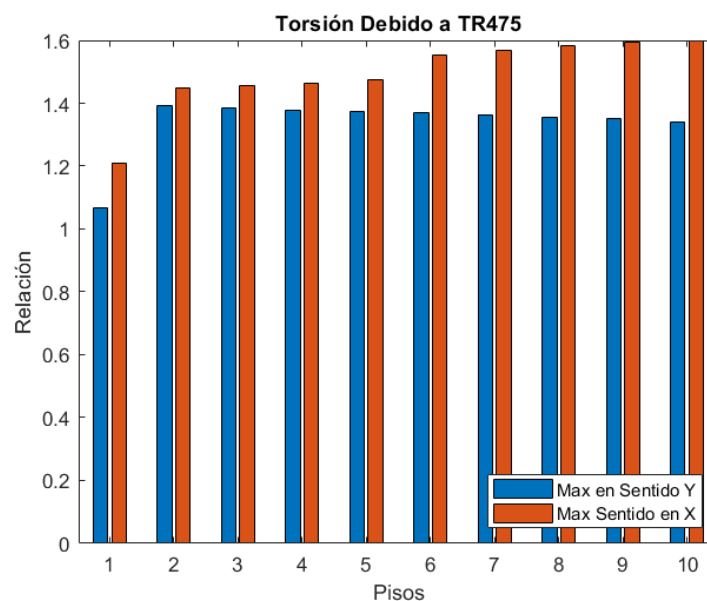


Fig. 10. Torsión debido a TR475

Se debe recordar que el análisis modal espectral no es un análisis que empuja en una dirección en específico, por el contrario, este análisis responde a los modos de vibración.

3.4 Selección de señales, estructura empotrada

Para la selección de señales, se hará referencia al capítulo 16 del Código (ASCE 7-16, 2017), también se desarrollará basado en las secciones 11.4.7 y 11.4.8 del mismo código.

De acuerdo a la sección 16.2.2 del código (ASCE 7-16, 2017) si se aplica análisis no lineal, no se deberá seleccionar menos de 11 registros para cada espectro objetivo. Los registros deberán consistir en pares de componentes horizontales ortogonales y en el caso de que se consideren sismos verticales, se deberá considerar una componente vertical del movimiento del suelo. Cabe recalcar que los registros seleccionados deben pertenecer al mismo régimen tectónico, y deben tener magnitudes y distancias de falla similares al espectro objetivo.

3.4.1 Selección de registros para la zona de Quito - Ecuador

Ecuador se encuentra en la parte oeste de la tierra, por lo tanto, se debe seleccionar NGA WEST2.

A continuación, se procede a cargar en la página del Peer, el espectro creado anteriormente, con las características descritas para la zona de Quito.

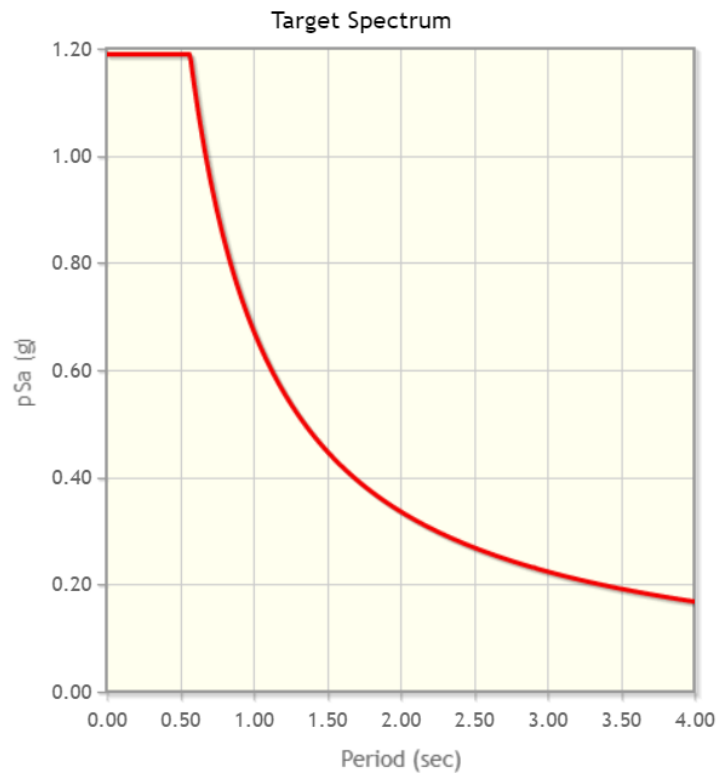


Fig. 11. Espectro NEC cargado en la página del PEER

Es importante tener en cuenta que, para Quito se espera que las magnitudes de diseño sísmico para períodos de retorno de 475 años, sean entre 6 y 7.5 en escala de momento magnitud.

Cabe recalcar que hay distintos tipos de fallamiento sísmico, para la ciudad de Quito, los sistemas de fallamiento sísmico son de campo cercano, es decir son fallas inversas de corta distancia, adicionalmente, los tipos de fallamiento principales para Quito son inversas/oblicuas

Se debe considerar la distancia que existe entre la estructura y la zona de falla más propensa a liberar energía, Quito está construida sobre el sistema de fallamiento, por lo tanto, la longitud de campo cercano se considerará entre los primeros 50 km, la longitud de campo medio de 50 a 250 km, y de campo lejano entre 250 a 500 km.

3.4.2 Onda de Corte a los 30 metros (Vs)

Para obtener este parámetro, se debe realizar el estudio de suelos respectivo de la zona en donde se establecerá la estructura, sin embargo, para este caso se emplean los conceptos de (NEC Committee, 2014) en la cual dice que, para un suelo tipo C, la velocidad se encuentra en un rango de 360 a 760 m/s.

New Search

Search

These characteristics are defined in the NGA-West2 Flatfile. You need to re-run Search when any of these parameters are updated.

Record Characteristics:

RSN(s) :
RSN1,..RSNn

Event Name :

Station Name :

Search Parameters:

Fault Type :

Magnitude :
min,max

R_JB(km) :
min,max

R_rup(km) :
min,max

Vs30(m/s) :
min,max

D5-95(sec) :
min,max

Pulse :

Additional Characteristics:

Max No. Records :
(<=100)

Initial ScaleFactor :
min,max

Suite

Spectral Ordinate :

Damping Ratio :

Suite Average :

Scaling

Scaling Method :

MSE = Computed Weighted Mean Squared Error of record, and suite average, wrt target spectrum.

Weight Function

Used in both search and scaling when computing MSE. Values can be updated for rescaling. Intermediate points are interpolated with $W = \text{fxn}(\log(T))$

Period Points : ($T_1, T_2, \dots T_n$)

Weights : ($W_1, W_2, \dots W_n$)

Fig. 12. Datos ingresados para la selección de registros

39

3.5 Registros

A continuación, se presentan los 11 registros escalados obtenidos en el programa después de insertar toda la información detallada anteriormente en la página del PEER. Es importante recalcar que los registros vienen en sus tres componentes, la componente Norte – Sur, Este – Oeste, y Vertical.

3.6 Registros en la componente Norte – Sur

A continuación, se presentan los 11 registros requeridos en la componente norte – sur.

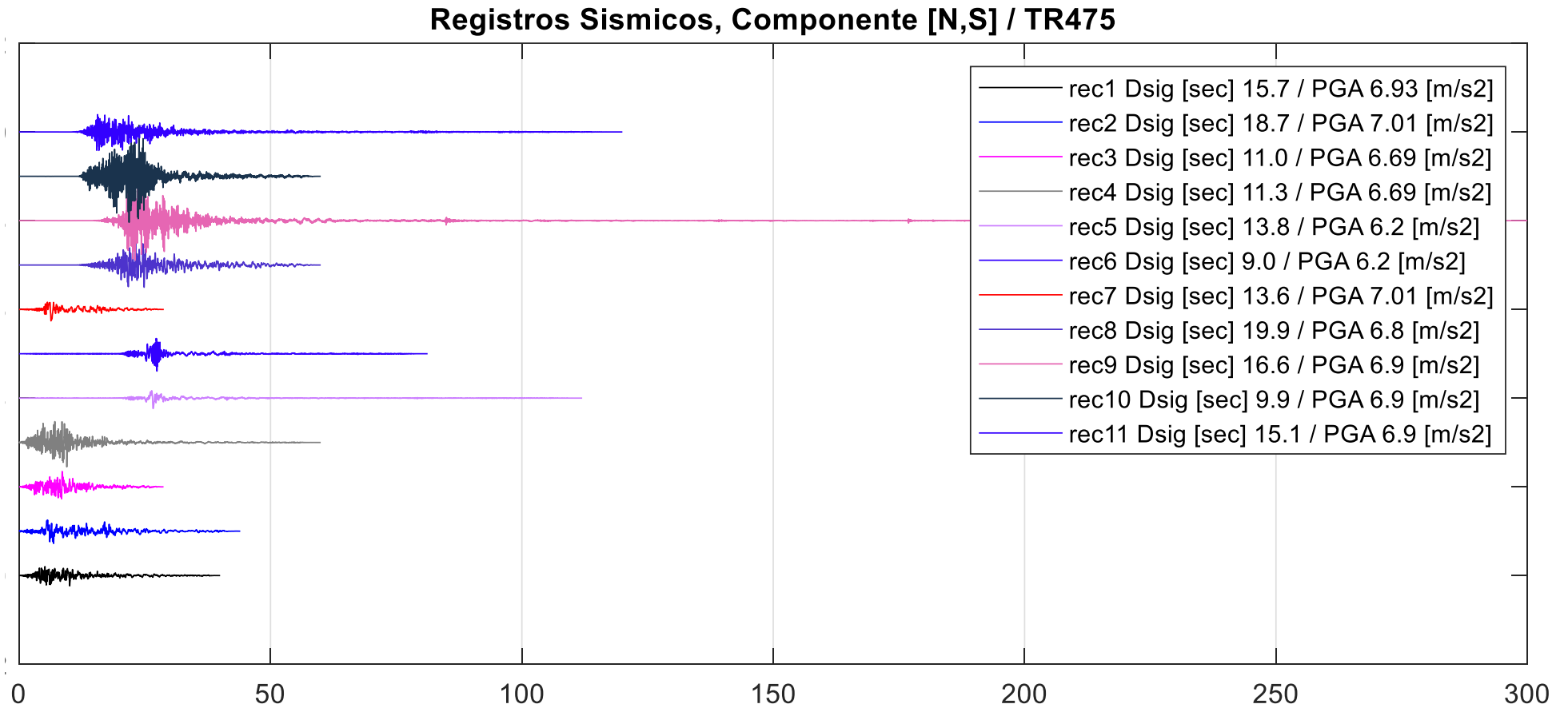


Fig. 13. Registros Sísmicos, Componente [N, S] / TR475

3.6.1 Registros en la componente Este – Oeste

A continuación, se presentan los 11 registros requeridos en la componente este – oeste.

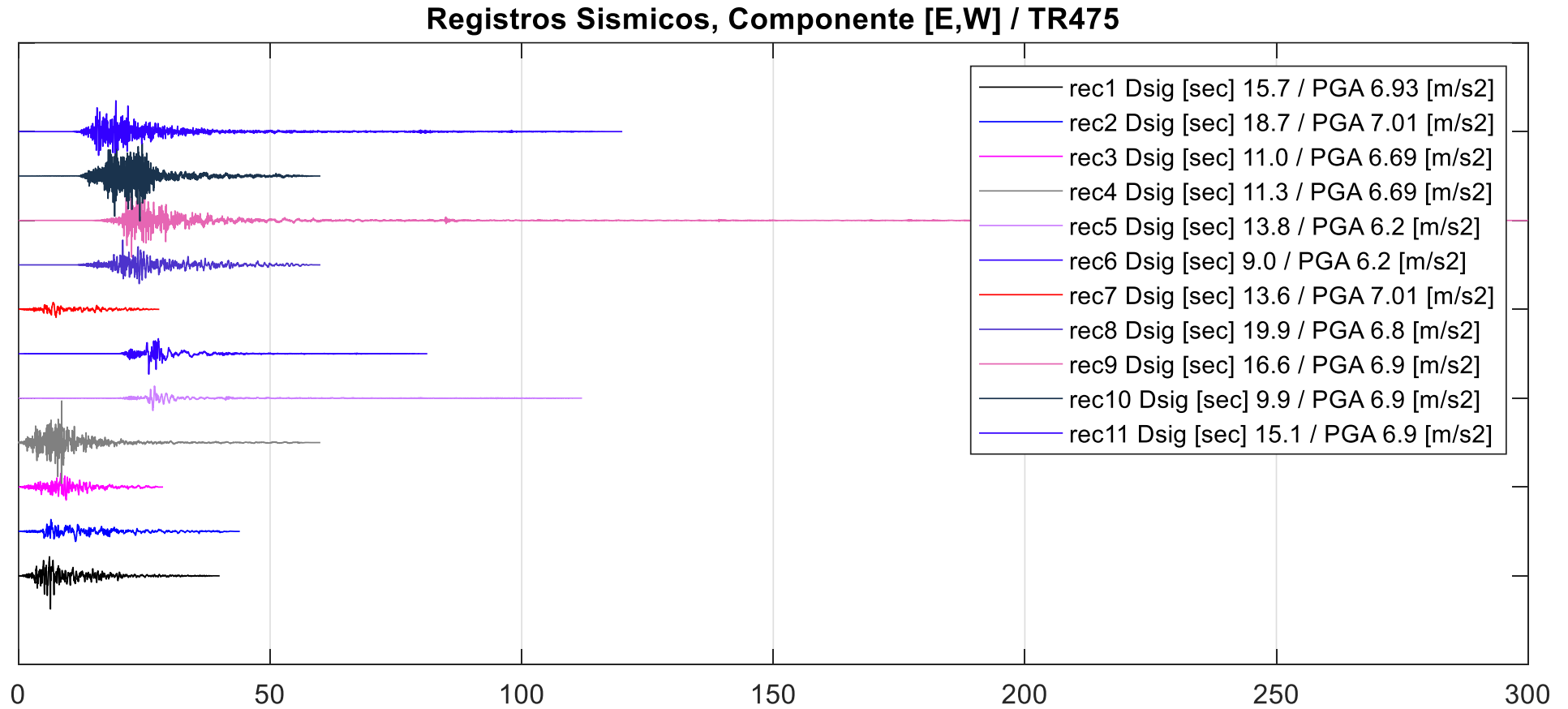


Fig. 14. Registros Sísmicos, Componente [E, W] / TR475

3.6.2 Registros en la componente Vertical

A continuación, se presentan los 11 registros requeridos en la componente vertical

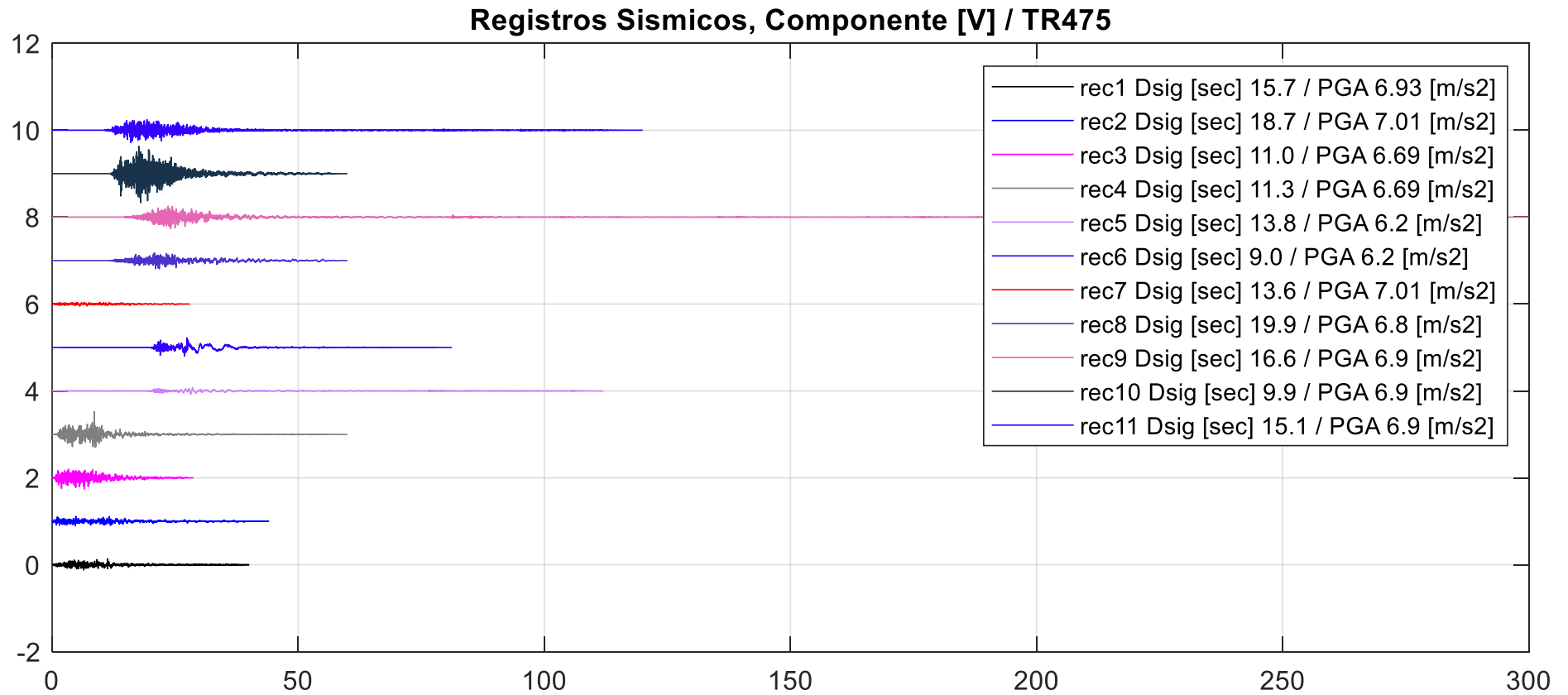


Fig. 15. Registros Sísmicos, Componente [V] / TR475

3.7 Análisis Tiempo – Historia, estructura empotrada

Una vez que se hayan cargado y escalado los registros en el programa Etabs, se debe realizar el análisis Tiempo – Historia para obtener resultados de deriva, cortante y desplazamiento. Es importante mencionar que, al ser registros adaptados a la curva de análisis modal espectral, se deben obtener registros semejantes a los anteriores.

3.7.1 Deriva inelástica de piso (11 registros / Análisis tiempo historia)

A continuación, se muestran las derivas de piso que son el resultado de los 11 registros cargados en el programa, adicionalmente se señala su envolvente.

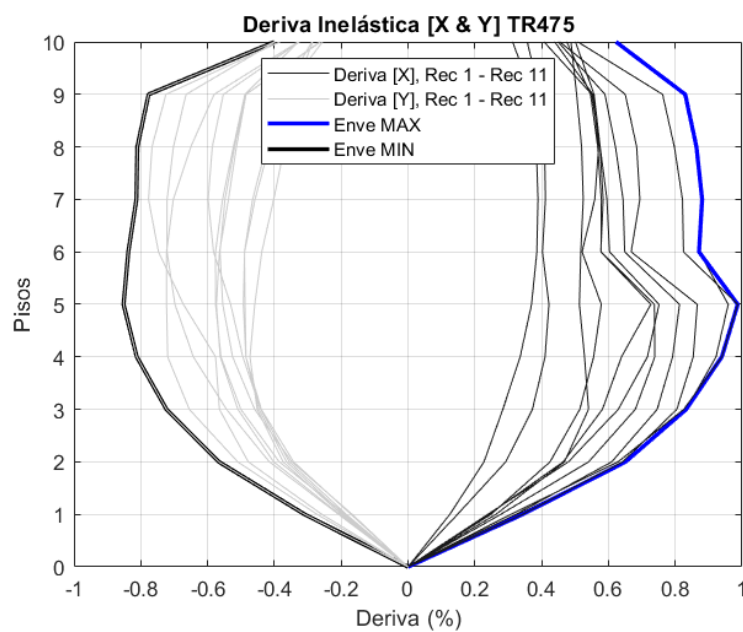


Fig. 16. Deriva, Análisis Tiempo Historia

3.7.2 Cortante inelástico de piso (11 registros / Análisis tiempo historia)

A continuación, se muestran los cortantes de piso que son el resultado de los 11 registros cargados en el programa, adicionalmente se señala su envolvente.

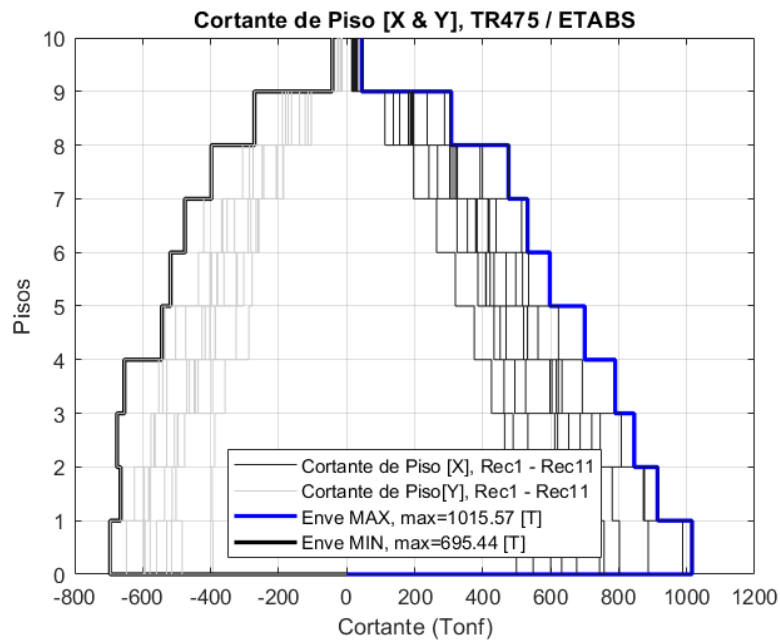


Fig. 17. Cortante, Análisis Tiempo Historia

3.7.3 Desplazamiento inelástico de piso (11 registros / Análisis tiempo historia)

A continuación, se muestran los desplazamientos de piso que son el resultado de los 11 registros cargados en el programa, adicionalmente se señala su envolvente.

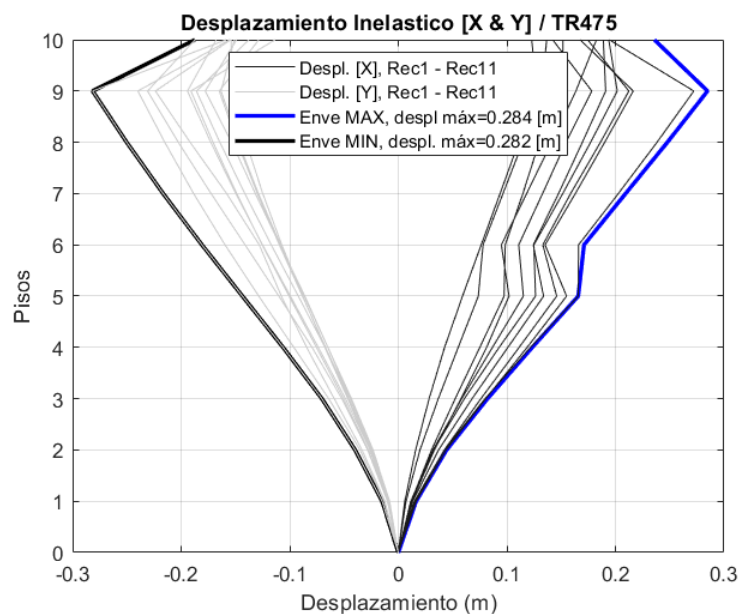


Fig. 18. Desplazamiento, Análisis Tiempo Historia

3.7.4 Torsión (11 registros / Análisis tiempo historia)

A continuación, se muestran los resultados de torsión de los pisos del 1 al 10 en el sentido x debido a la influencia de los 11 registros ingresados.

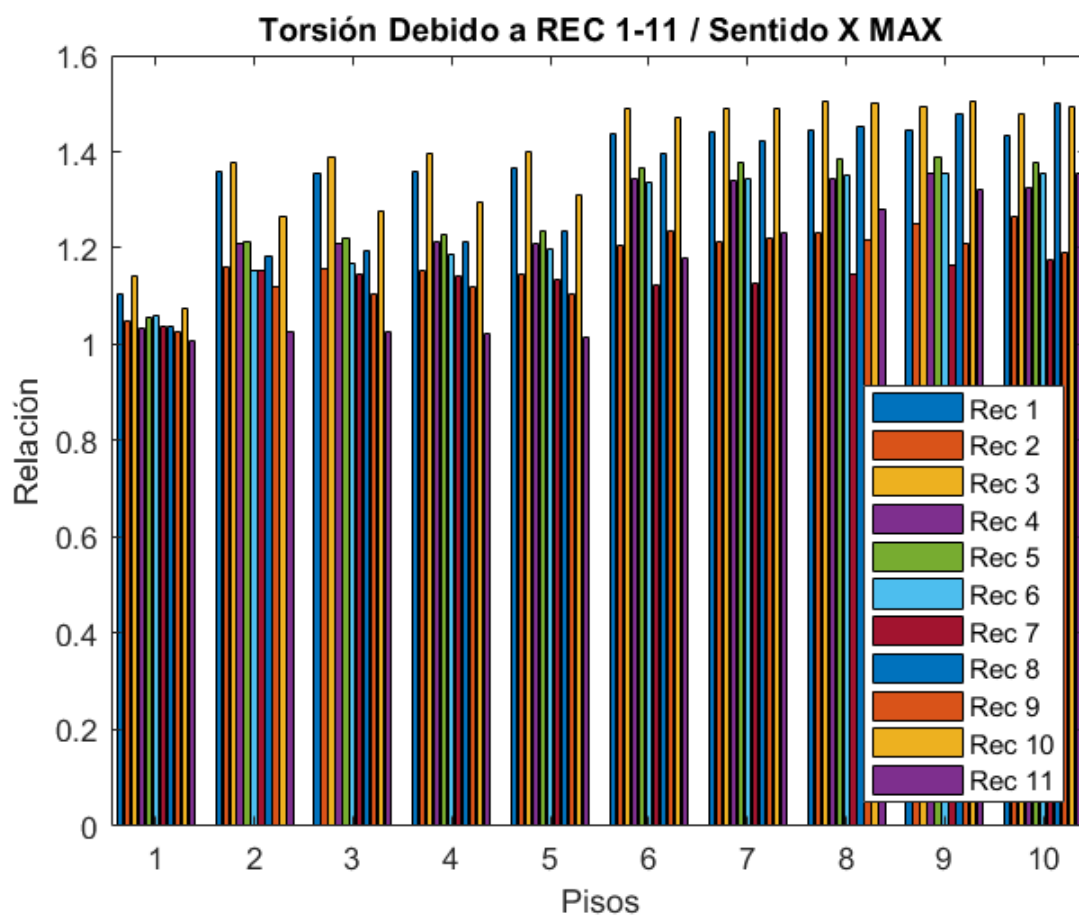


Fig. 19. Torsión máxima, sentido x

A continuación, se muestran los resultados de torsión de los pisos del 1 al 10 en el sentido y.

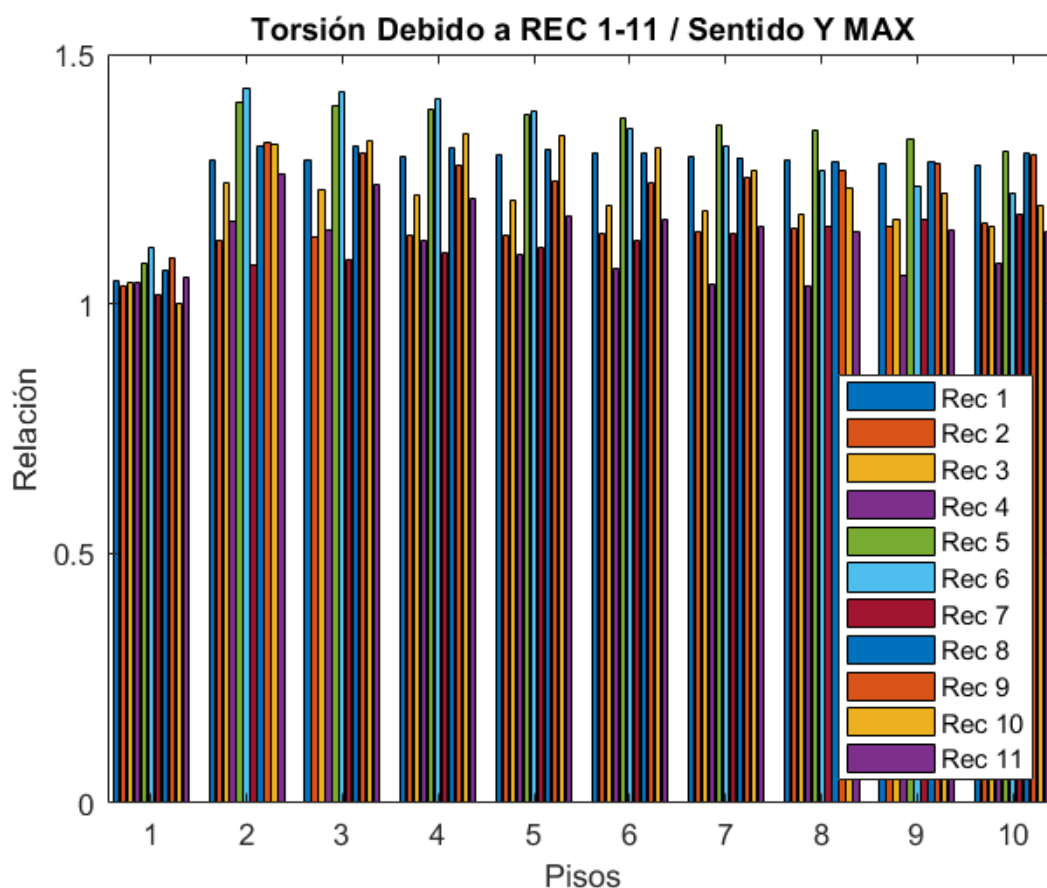


Fig. 20. Torsión máxima, sentido “y”

Tanto en el análisis modal espectral, como en el análisis de tiempo historia que contiene los 11 registros seleccionados, superan la relación de 1.4 que menciona el ASCE 7-16 sobre la torsión en planta, por lo que se concluye que se debe realizar un análisis no lineal a la estructura.

3.8 Aislador Triple Péndulo (FPT)

El fundamento para la generación de los modelos matemáticos para el aislador de base de tercera generación que se mostrará en esta investigación será de acuerdo al aislador del catálogo del fabricante “Earthquake Systems”. Se seleccionó el aislador de triple péndulo FPT15656R/16-12R/12- A continuación, se muestran las propiedades geométricas del aislador

Vista en elevación:

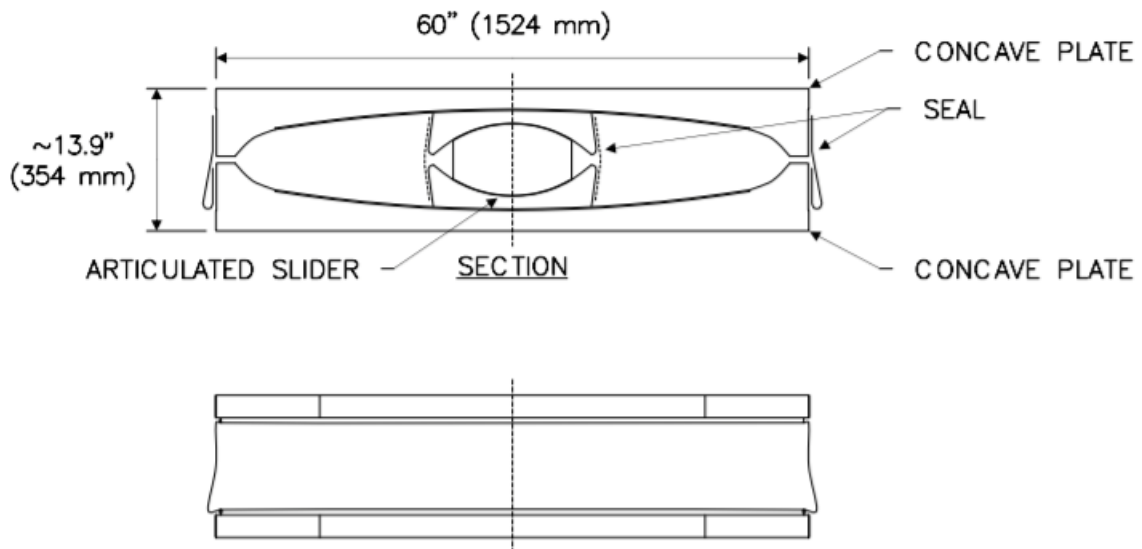


Fig. 21. Vista en elevación del aislador

(Earthquake Protection Systems, 2021)

Vista en planta:

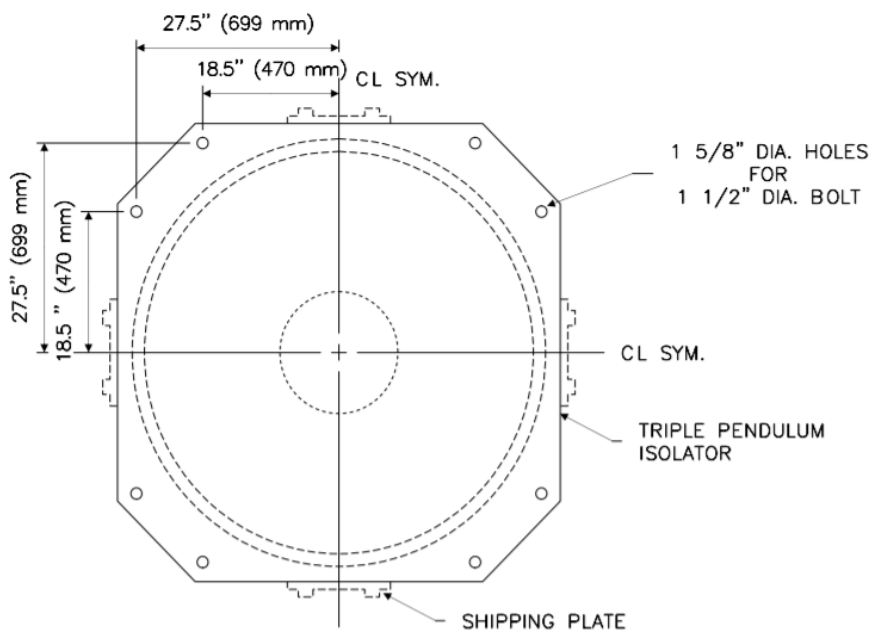


Fig. 22. Vista en planta del aislador

Fuente: (Earthquake Protection Systems, 2021)

3.9 Datos del Fabricante

El fabricante (Earthquake Protection Systems) al proporcionar la ficha técnica de su aislador, compartió información que servirá para realizar el espectro modal de aislación, curva de histéresis, etc., a continuación, se presentan los datos provistos por el fabricante.

3.10 Tolerancias del testeo del aislador FPT15656R/16-12R/12-7

Tolerancias QC del Testeo:

Carga QC: 1208 Kips (5373 kN) min. Es la mínima carga que resistirá el aislador.

Propiedades Promedio del Aislador

	f1	f2	f3
LOWER	0.005	0.02	0.05
UPPER	0.01	0.03	0.06

Tabla 1. Propiedades promedio del aislador

Propiedades Individuales del Aislador

	f1	f2	f3
LOWER	0.002	0.015	0.045
UPPER	0.01	0.03	0.06

Tabla 2. Propiedades individuales del aislador

Longitudes del péndulo

L1 = 17" (432mm)

L2 = 160" (4058mm)

L3 = 303" (7684mm)

Períodos del Péndulo

T1 = 1.3 sec

T2 = 4 sec

T3 = 5.6 sec

Capacidades de desplazamiento

Dtmc = 44.9" (1142mm)

Dmc = 29.9" (761mm)

Capacidad de Resistencia al Corte a la Carga QC

Vmc = 308 kips (1370kN)

3.11 Curva de Histéresis del Aislador FPT15656R/16-12R/12-7

Con la información provista por el fabricante, se procede a calcular la curva de histéresis, más adelante se realizará una rutina de programación en el software "Matlab" en el que se generará un modelo

matemático para automatizar este proceso y obtener la curva de histéresis inmediatamente. Cabe recalcar que se realizarán modelos bilineales.

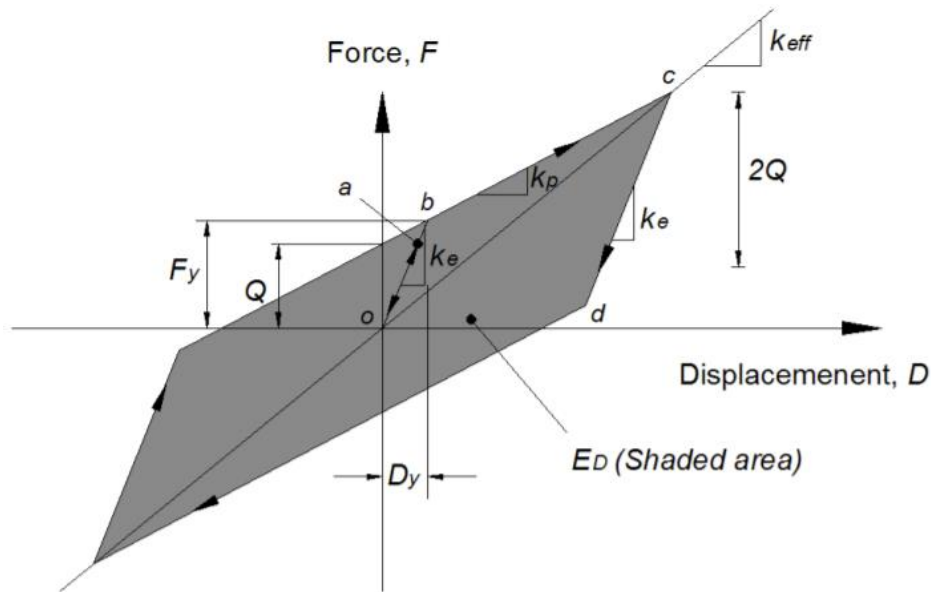


Fig. 23. Curva de Histéresis

Fuente: (Suntaxi, 2016)

En la Fig. 18 se detallan las fórmulas que comprenden la curva, las mismas que se encuentran en función de la fuerza y el desplazamiento del aislador.

Se debe destacar que el aislador de triple péndulo friccionante tiene 6 etapas, estas son: DBE, MCE, Etapa 3, 4, 5 y 6. Los valores de f_1 , f_2 y f_3 son coeficientes de fricción adimensionales que se obtienen a partir de ensayos. Por otro lado, los valores de L_1 , L_2 y L_3 son distancias que el fabricante proporciona, L_1 está netamente relacionado con la geometría del aislador y L_2 y L_3 se obtiene partir de ensayos realizados por el mismo.

Por lo tanto, los datos iniciales que se cumplen para todas las etapas que sirven para realizar la curva de histéresis serían los siguientes:

	f_1	f_2	f_3	L_1 (mm)	L_2 (mm)	L_3 (mm)
DBE	0.010	0.030	0.060	432	4058	7684
MCE	0.010	0.030	0.060	432	4058	7684
Etapa 3	0.010	0.030	0.060	432	4058	7684
Etapa 4	0.010	0.030	0.060	432	4058	7684
Etapa 5	0.010	0.030	0.060	432	4058	7684
Etapa 6	0.010	0.030	0.060	432	4058	7684

Tabla 3. Datos iniciales proporcionados por el fabricante

Elaborado por Bernardo Medina

Adicional el fabricante brinda la siguiente información que se utilizará más adelante para crear la curva de histéresis

	D (mm)	EDC (W)	F (kn/kn)	Teff (sec.)	Damping	K_{eff} (kn/mm/kn)
DBE	338	50	0.0870	3.952	0.269	0.000258
MCE	625	99	0.1244	4.496	0.203	0.000199
Etapa 3	806	130	0.1480	4.682	0.174	0.000184
Etapa 4	928	144	0.1780	4.580	0.139	0.000192
Etapa 5	978	146	0.2946	3.655	0.081	0.000301
Etapa 6	1143	154	0.6752	2.609	0.032	0.000591

Tabla 4. Datos procesados por el fabricante

3.11.1 Desplazamiento Inicial Asumido

El desplazamiento inicial se lo debe asumir en función del centro geométrico del aislador, en las tablas de la ficha técnica del fabricante se pueden visualizar los desplazamientos iniciales para todas las etapas.

3.11.2 Etapas y Ciclos de la curva de histéresis

Cada etapa está comprendida por seis ciclos, esto quiere decir que para cada ciclo se tendrá una fórmula que representa un punto en la curva.

3.11.3 Etapa 1

Etapa 1 Ciclo 0

El primer par ordenado de la etapa uno (que será el punto de partida) comprende un desplazamiento de 0 mm y el coeficiente de fricción adimensional (f_1) que proporciona el fabricante.

Etapa 1 Ciclo 1

Para el primer ciclo que sería el segundo par ordenado, se lo obtiene al seleccionar el desplazamiento de 338 mm y la fuerza de 0.087 kn/kn.

Etapa 1 Ciclo 2

Para el segundo ciclo que sería el tercer par ordenado, se lo obtiene de la siguiente manera:

En x:

Se selecciona el desplazamiento inicial asumido (338 mm)

En y:

$$F_1 - f_{1_1}$$
$$0.087 - 0.01 = 0.077 \text{ kn/kn}$$

Donde:

F_1 = Fuerza kn/kn

f_{1_1} = Coeficiente de fricción, correspondiente a la etapa 1

Etapa 1 Ciclo 3

Para el tercer ciclo que sería el cuarto par ordenado, se lo obtiene de la siguiente manera:

En x:

$$D_{n-1} - (EDC \times \beta_{eff_1})$$
$$338 - (50 \times 0.269) = 324.55 \text{ mm}$$

Donde:

D_{n-1} = Desplazamiento asumido

B_{eff_1} = Amortiguamiento efectivo correspondiente a la etapa 1

EDC =

En y:

$$F_{1_{n-1}} - f_{2_1}$$
$$0.077 - 0.03 = 0.047 \text{ kn/kn}$$

Donde:

$F_{1_{n-1}}$ = Fuerza correspondiente a la etapa 1

f_{2_1} = Coeficiente de fricción 2 correspondiente a la etapa 1

Etapa 1 Ciclo 4

Para el cuarto ciclo que sería el quinto par ordenado, se lo obtiene de la siguiente manera:

En x:

$$L_1 - D_{o1}$$
$$432 - 338 = 94 \text{ mm}$$

Donde:

L_1 = Longitud 1

D_{o1} = Desplazamiento asumido inicial

En y:

$$F_{1_{n-1}} - f_{3_1}$$
$$0.047 - 0.06 = -0.013 \text{ kn/kn}$$

Donde:

f_{3_1} = Coeficiente de fricción 3 correspondiente a la etapa 1

Como se observó anteriormente, la curva tiene varios ciclos, sin embargo, la curva es simétrica por lo tanto todos estos valores se los multiplica por -1 y se obtendrá la curva deseada.

En la ficha técnica el fabricante muestra que la primera etapa es el sismo de diseño, por lo tanto, se denominará a esta etapa como DBE.

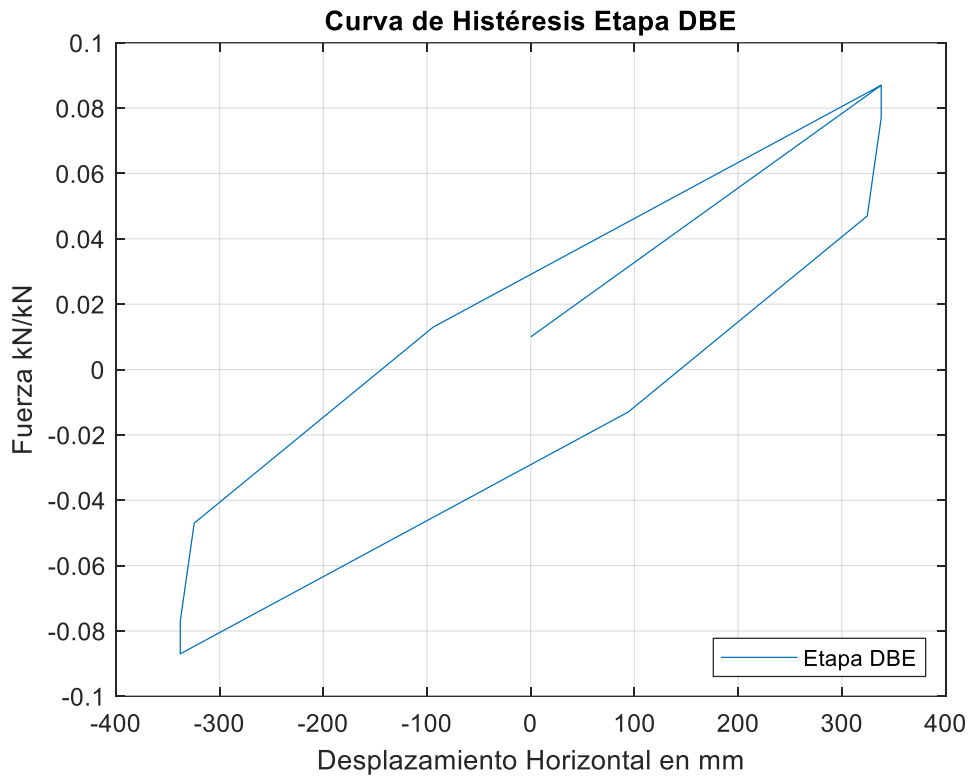


Fig. 24. Curva de Histéresis, etapa DBE

3.11.4 Etapa 2

Etapa 2 Ciclo 0

El primer par ordenado de la etapa dos (que será el punto de partida y es proporcionado por el fabricante) comprende un desplazamiento de 625 mm en las abscisas y en las ordenadas la siguiente ecuación

En y:

$$D_{0_2} - (2 \times f_{1_2})$$

$$0.1244 - (2 \times 0.01) = 0.1044 \text{ kn/kn}$$

Donde:

D_{0_2} = Desplazamiento inicial asumido correspondiente a la etapa 2

$f_{1,2}$ = Coeficiente de fricción 1 correspondiente a la etapa 2

Etapa 2 Ciclo 1

Para el primer ciclo que sería el segundo par ordenado, se lo obtiene de la siguiente manera:

En x:

Se selecciona el desplazamiento inicial asumido (625 mm)

En y:

$$F_{2_{n-1}} - f_{1,2}$$

$$0.1044 - 0.01 = 0.0944 \text{ kn/kn}$$

Donde:

$F_{2_{n-1}}$ = Fuerza correspondiente a la etapa 2

$f_{1,2}$ = Coeficiente de fricción 1 correspondiente a la etapa 2

Etapa 2 Ciclo 2

Para el segundo ciclo que sería el tercer par ordenado, se lo obtiene de la siguiente manera:

En x:

$$D_{n-1} - (EDC \times \beta_{eff_2})$$

$$625 - (99 \times 0.203) = 604.903 \text{ mm}$$

Donde:

D_{n-1} = Desplazamiento asumido de la etapa 2

β_{eff_2} = Amortiguamiento efectivo correspondiente a la etapa 2

EDC =

En y:

$$F_{2_{n-1}} - f_{2_2}$$
$$0.0944 - 0.03 = 0.0644 \text{ kn/kn}$$

Donde:

$F_{1_{n-1}}$ = Fuerza correspondiente a la etapa 2

f_{2_1} = Coeficiente de fricción 2 correspondiente a la etapa 2

Etapa 2 Ciclo 3

Para el tercer ciclo que sería el cuarto par ordenado, se lo obtiene de la siguiente manera:

En x:

$$L_{1_2} - D_{o2}$$
$$625 - 432 = 193 \text{ mm}$$

Donde:

L_{1_2} = Longitud 1 correspondiente a la etapa 2

D_{o2} = Desplazamiento asumido inicial de la etapa 2

En y:

$$F_{2_{n-1}} - f_{3_2}$$
$$0.0644 - 0.06 = -0.0044 \text{ kn/kn}$$

Donde:

f_{3_1} = Coeficiente de fricción 3 correspondiente a la etapa 2

Como se observó anteriormente, la curva tiene varios ciclos, sin embargo, la curva es simétrica por lo tanto todos estos valores se los multiplica por -1 y se obtendrá la curva deseada.

En la ficha técnica el fabricante muestra que la segunda etapa es el sismo máximo considerado, por lo tanto, se denominará a esta etapa como MCE.

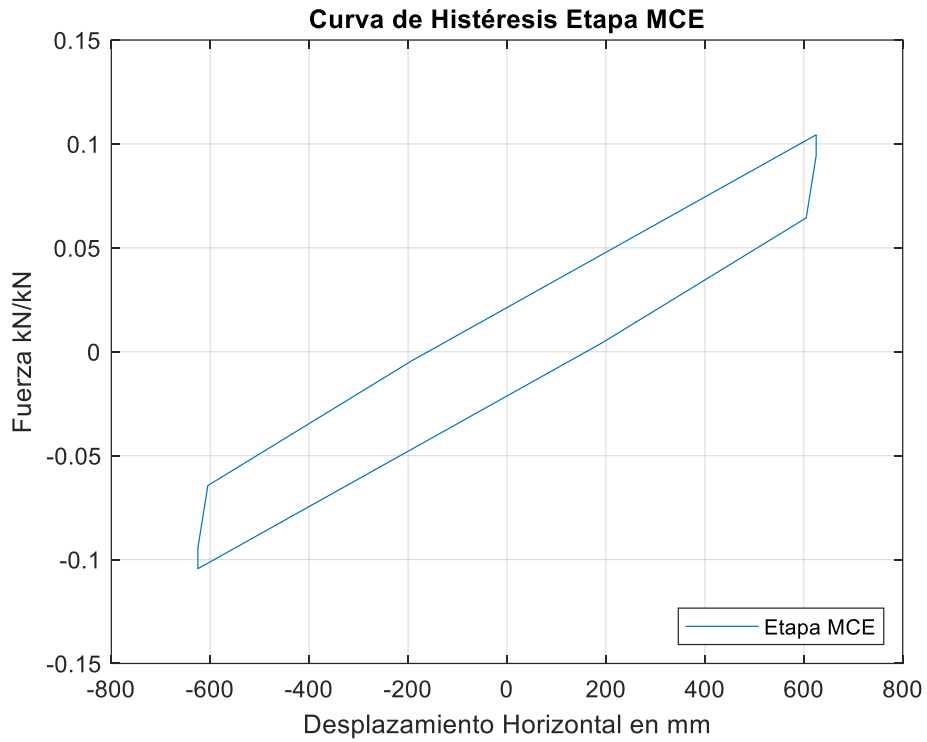


Fig. 25. Curva de Histéresis, etapa MCE

3.11.5 Etapa 3

Etapa 3 Ciclo 0

El primer par ordenado de la etapa tres (que será el punto de partida y es proporcionado por el fabricante) comprende un desplazamiento de 806 mm en las abscisas y en las ordenadas la siguiente ecuación:

En y:

$$D_{o_3} - (2 \times f_{1_3})$$

$$0.148 - (2 \times 0.01) = 0.128 \text{ kn/kn}$$

Donde:

D_{o_3} = Desplazamiento inicial asumido correspondiente a la etapa 3

f_{1_3} = Coeficiente de fricción 1 correspondiente a la etapa 3

Etapa 3 Ciclo 1

Para el primer ciclo que sería el segundo par ordenado, se lo obtiene de la siguiente manera:

En x:

Se selecciona el desplazamiento inicial asumido (806 mm)

En y:

$$F_{3_{n-1}} - f_{1_3}$$

$$0.128 - 0.01 = 0.118 \text{ kn/kn}$$

Donde:

$F_{2_{n-1}}$ = Fuerza correspondiente a la etapa 3

f_{1_2} = Coeficiente de fricción 1 correspondiente a la etapa 3

Etapa 3 Ciclo 2

Para el segundo ciclo que sería el tercer par ordenado, se lo obtiene de la siguiente manera:

En x:

$$D_{n-1} - (EDC \times \beta_{eff_3})$$

$$806 - (130 \times 0.174) = 604.903 \text{ mm}$$

Donde:

D_{n-1} = Desplazamiento asumido de la etapa 3

B_{eff_3} = Amortiguamiento efectivo correspondiente a la etapa 3

EDC =

En y:

$$F_{3_{n-1}} - f_{2_3}$$

$$0.118 - 0.03 = 0.088 \text{ kn/kn}$$

Donde:

$F_{1_{n-1}}$ = Fuerza correspondiente a la etapa 3

f_{2_1} = Coeficiente de fricción 2 correspondiente a la etapa 3

Etapa 3 Ciclo 3

Para el tercer ciclo que sería el cuarto par ordenado, se lo obtiene de la siguiente manera:

En x:

$$L_{1_3} - D_{03}$$

$$806 - 432 = 374 \text{ mm}$$

Donde:

L_{1_3} = Longitud 1 correspondiente a la etapa 3

D_{03} = Desplazamiento asumido inicial de la etapa 3

En y:

$$F_{3_{n-1}} - f_{3_3}$$

$$0.088 - 0.06 = -0.028 \text{ kn/kn}$$

Donde:

f_{3_1} = Coeficiente de fricción 3 correspondiente a la etapa 2

Como se observó anteriormente, la curva tiene varios ciclos, sin embargo, la curva es simétrica por lo tanto todos estos valores se los multiplica por -1 y se obtendrá la curva deseada.

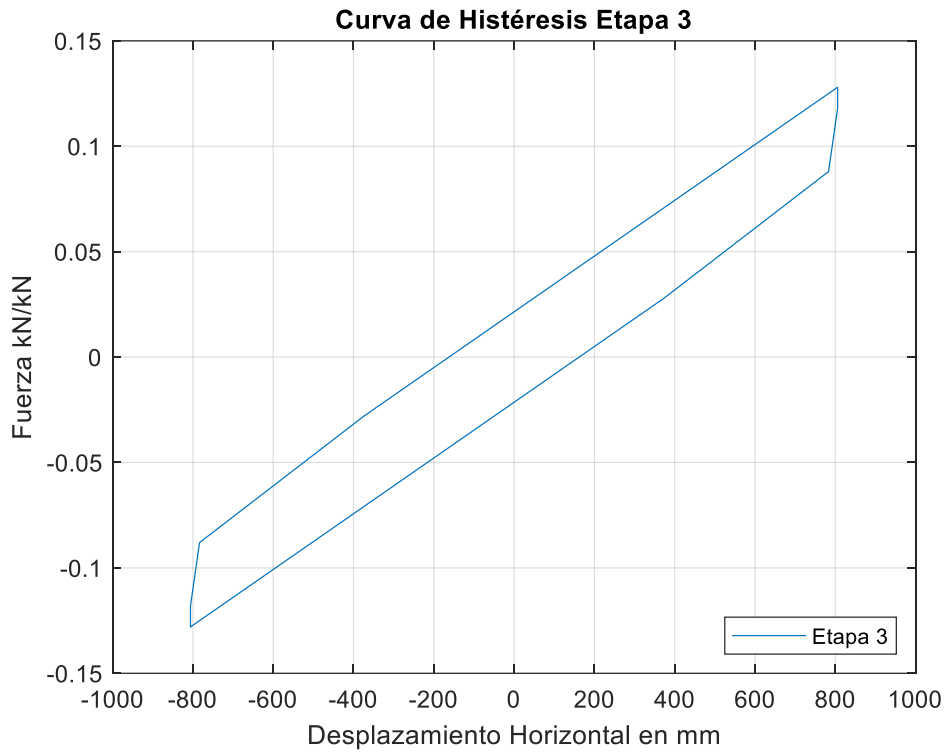


Fig. 26. Curva de histéresis, etapa 3

3.11.6 Etapa 4

Etapa 4 Ciclo 0

El primer par ordenado de la etapa cuatro (que será el punto de partida y es proporcionado por el fabricante) comprende un desplazamiento de 928 mm en las abscisas y en las ordenadas la siguiente ecuación:

En y:

$$D_{o_4} - (2 \times f_{1_4})$$

$$0.178 - (2 \times 0.01) = 0.158 \text{ kn/kn}$$

Donde:

D_{o_4} = Desplazamiento inicial asumido correspondiente a la etapa 4

f_{1_4} = Coeficiente de fricción 1 correspondiente a la etapa 4

Etapa 4 Ciclo 1

Para el primer ciclo que sería el segundo par ordenado, se lo obtiene de la siguiente manera:

En x:

Se selecciona el desplazamiento inicial asumido (928 mm)

En y:

$$F_{4_{n-1}} - f_{1_4}$$

$$0.158 - 0.01 = 0.148 \text{ kn/kn}$$

Donde:

$F_{4_{n-1}}$ = Fuerza correspondiente a la etapa 4

f_{1_4} = Coeficiente de fricción 1 correspondiente a la etapa 4

Etapa 4 Ciclo 2

Para el segundo ciclo que sería el tercer par ordenado, se lo obtiene de la siguiente manera:

En x:

$$D_{n-1} - (EDC \times \beta_{eff_4})$$

$$928 - (144 \times 0.139) = 907.98 \text{ mm}$$

Donde:

D_{n-1} = Desplazamiento asumido de la etapa 4

β_{eff_4} = Amortiguamiento efectivo correspondiente a la etapa 4

EDC =

En y:

$$F_{4_{n-1}} - f_{2_4}$$
$$0.148 - 0.03 = 0.118 \text{ kn/kn}$$

Donde:

$F_{4_{n-1}}$ = Fuerza correspondiente a la etapa 4

f_{2_4} = Coeficiente de fricción 2 correspondiente a la etapa 4

Etapa 4 Ciclo 3

Para el tercer ciclo que sería el cuarto par ordenado, se lo obtiene de la siguiente manera:

En x:

$$L_{1_4} - D_{04}$$
$$928 - 432 = 496 \text{ mm}$$

Donde:

L_{1_4} = Longitud 1 correspondiente a la etapa 4

D_{04} = Desplazamiento asumido inicial de la etapa 4

En y:

$$F_{4_{n-1}} - f_{3_4}$$
$$0.118 - 0.06 = -0.058 \text{ kn/kn}$$

Donde:

f_{3_4} = Coeficiente de fricción 3 correspondiente a la etapa 4

Como se observó anteriormente, la curva tiene varios ciclos, sin embargo, la curva es simétrica por lo tanto todos estos valores se los multiplica por -1 y se obtendrá la curva deseada.

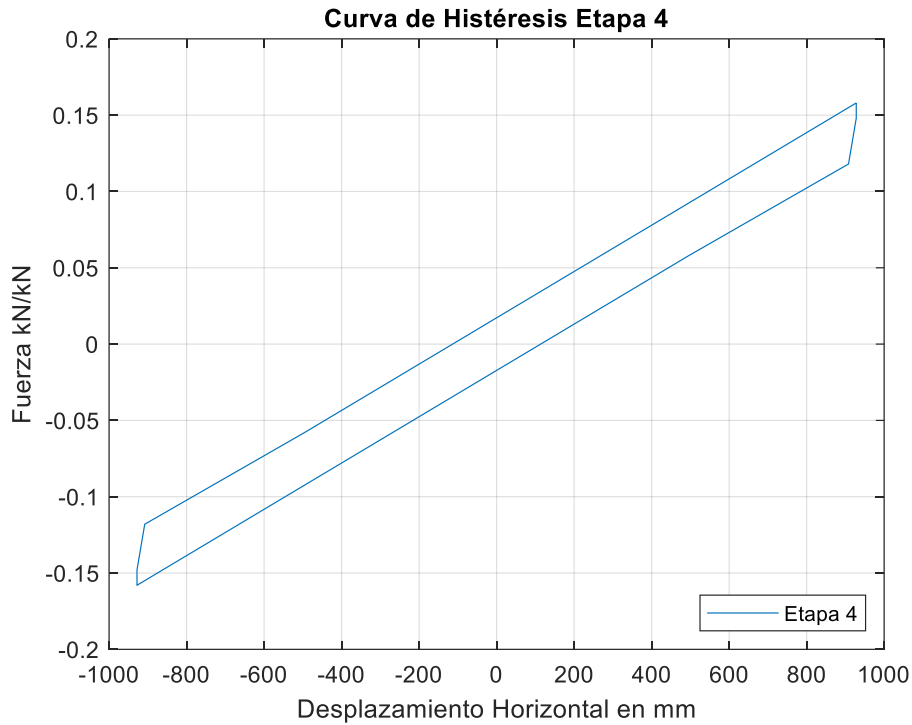


Fig. 27. Curva de histéresis, etapa 4

3.11.7 Etapa 5

Etapa 5 Ciclo 0

El primer par ordenado de la etapa cinco (que será el punto de partida y para dar continuidad a la curva y es proporcionado por el fabricante) comprende un desplazamiento de 928 mm en las abscisas y en las ordenadas la siguiente ecuación:

En y:

$$D_{0_5} - (2 \times f_{1_5})$$

$$0.178 - (2 \times 0.01) = 0.158 \text{ kn/kn}$$

Donde:

D_{0_5} = Desplazamiento inicial asumido correspondiente a la etapa 5

f_{1_5} = Coeficiente de fricción 1 correspondiente a la etapa 5

Etapa 5 Ciclo 1

Para el primer ciclo que sería el segundo par ordenado, se lo obtiene de la siguiente manera:

En x:

Se selecciona el desplazamiento inicial asumido (978 mm), proporcionado por el fabricante

En y:

$$F_5 - (2 \times f_5)$$

$$0.2946 - (2 \times 0.01) = 0.2746 \text{ kn/kn}$$

Donde:

F_5 = Fuerza correspondiente a la etapa 5

f_{1_5} = Coeficiente de fricción 1 correspondiente a la etapa 5

Etapa 5 Ciclo 2

Para el segundo ciclo que sería el tercer par ordenado, se lo obtiene de la siguiente manera:

En x:

Se selecciona el desplazamiento inicial asumido (978 mm), proporcionado por el fabricante

En y:

$$F_{5_{n-1}} - f_{1_5}$$

$$0.2746 - 0.01 = 0.2646 \text{ kn/kn}$$

Donde:

$F_{5_{n-1}}$ = Fuerza correspondiente a la etapa 5

F_{1_5} = Coeficiente de fricción 1 correspondiente a la etapa 5

Debido a la geometría y comportamiento físico del aislador, la etapa 5 tiene menos ciclos, más adelante se muestra de mejor manera la forma de la curva de esta etapa.

Como se observó anteriormente, la curva tiene varios ciclos, sin embargo, la curva es simétrica por lo tanto todos estos valores se los multiplica por -1 y se obtendrá la curva deseada.

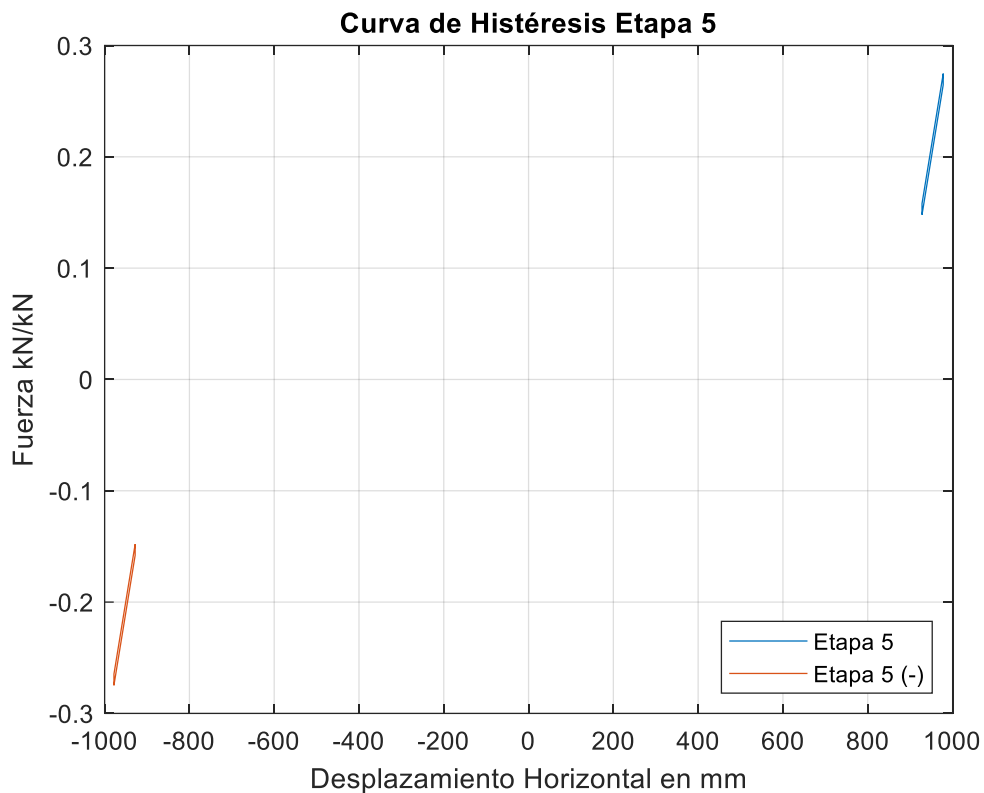


Fig. 28. Curva de histéresis, etapa 5

3.11.8 Etapa 6

Etapa 6 Ciclo 0

El primer par ordenado de la etapa cinco (que será el punto de partida y es proporcionado por el fabricante) comprende un desplazamiento de 1143 mm en las abscisas y en las ordenadas la siguiente ecuación:

En y:

$$D_{o_6} - (2 \times f_{1_6})$$

$$0.6752 - (2 \times 0.01) = 0.6552 \text{ kn/kn}$$

Donde:

$D_{0,6}$ = Desplazamiento inicial asumido correspondiente a la etapa 6

$f_{1,6}$ = Coeficiente de fricción 1 correspondiente a la etapa 6

Etapa 6 Ciclo 1

Para el primer ciclo que sería el segundo par ordenado, se lo obtiene de la siguiente manera:

En x:

Se selecciona el desplazamiento inicial asumido (1143 mm), proporcionado por el fabricante

En y:

$$F_{6n-1} - f_{1,6}$$

$$0.6552 - 0.01 = 0.6452 \text{ kn/kn}$$

Donde:

F_{6n-1} = Fuerza correspondiente a la etapa 6

$F_{1,6}$ = Coeficiente de fricción 1 correspondiente a la etapa 6

Debido a la geometría y comportamiento físico del aislador, la etapa 6 tiene menos ciclos, más adelante se muestra de mejor manera la forma de la curva de esta etapa.

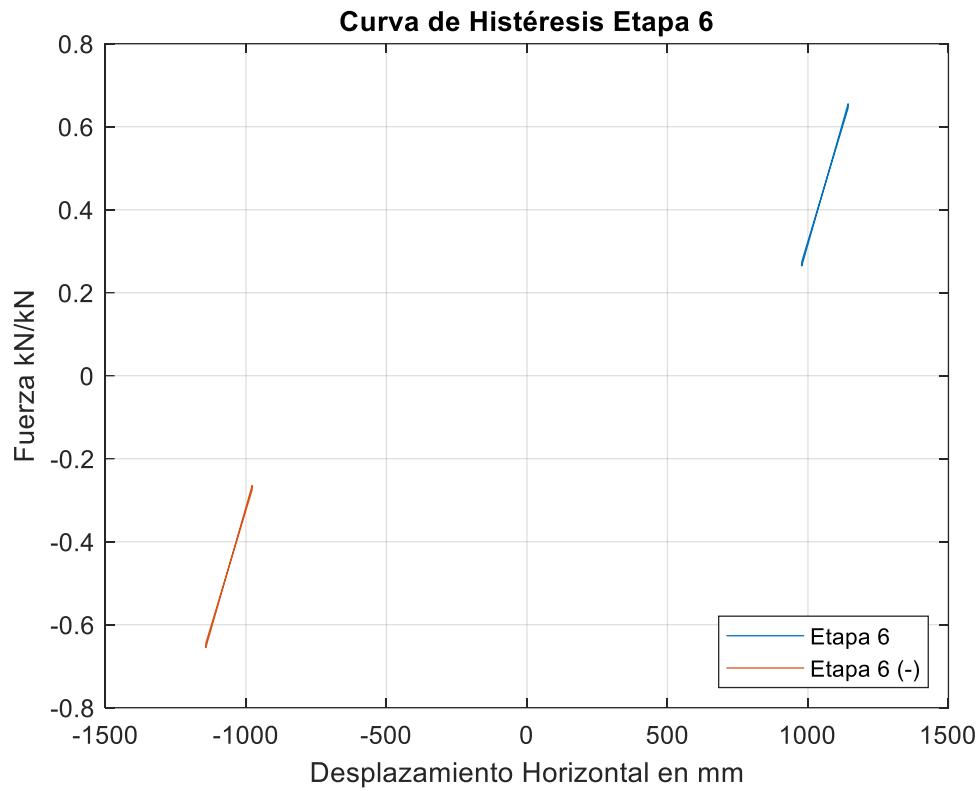


Fig. 29. Fig. 23 Curva de histéresis, etapa 6

Como se observó anteriormente, la curva tiene varios ciclos, sin embargo, la curva es simétrica por lo tanto todos estos valores se los multiplica por -1 y se obtendrá la curva deseada.

Una vez se hayan realizado los cálculos de cada etapa, se procede a unir todos los procedimientos, obteniendo la siguiente curva:

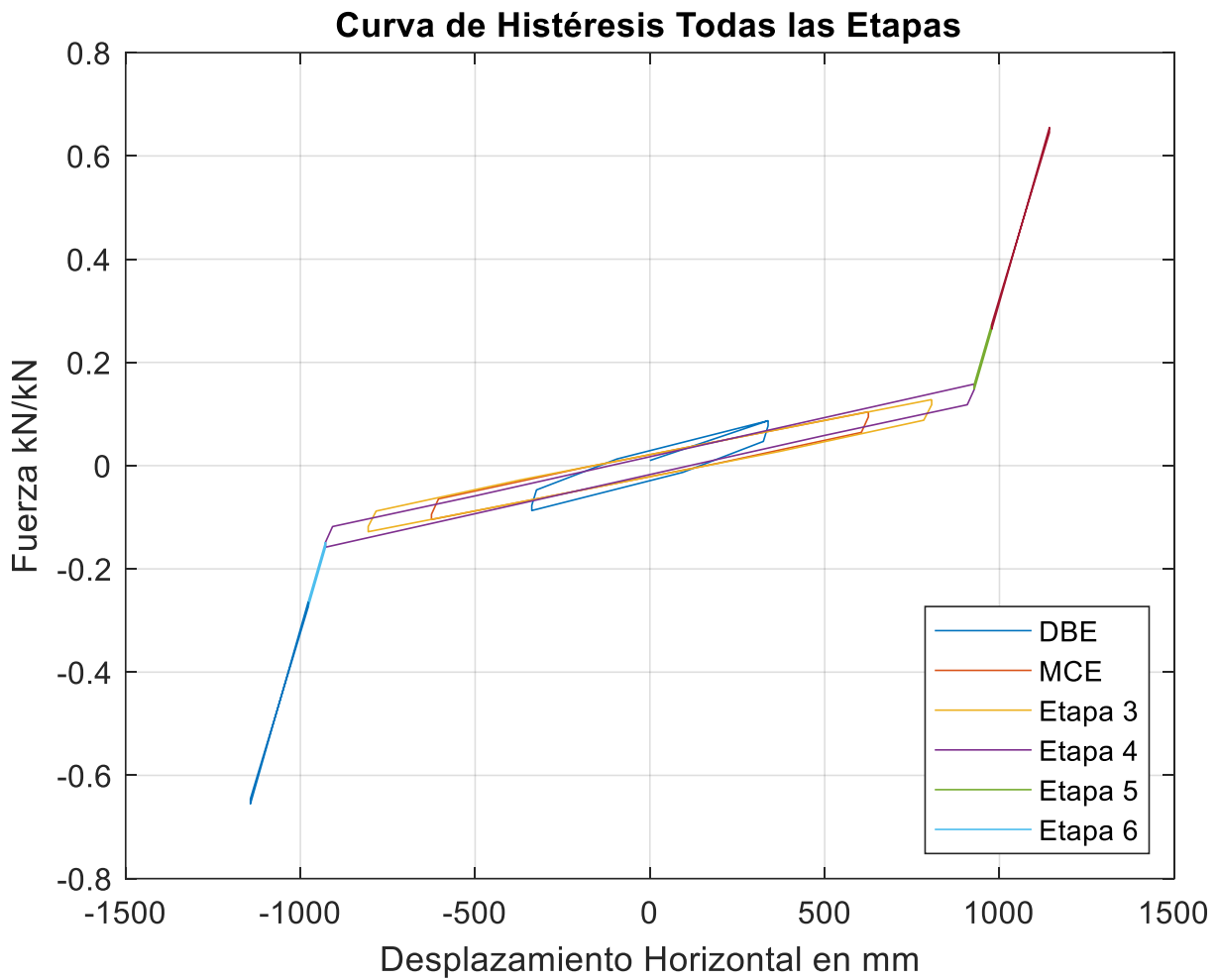


Fig. 30. Curva de histéresis del aislador

3.12 Cálculo de la Rigidez Efectiva (k_M)

Se procede a calcular la rigidez efectiva con la fórmula del ASCE 7-16, capítulo 17, fórmula (17.5-5).

$$V_b = k_M \times D_M$$

$$k_M = \frac{V_b}{D_M}$$

Donde:

V_b = Fuerza de corte (kn/kn)

D_M = Desplazamiento asumido (mm)

$$k_M = \frac{0.0870 \left(\frac{kn}{kn} \right)}{338 \text{ mm}}$$

$$k_M = 0.000258 \left(\frac{\frac{kn}{mm}}{kn} \right)$$

De la misma forma se realizaría para las siguientes etapas, obteniendo los siguientes resultados

Etapas	V_b (kN/kN)	D (mm)	k_M (kN/mm/kN)
DBE	0.0870	338	0.000258
MCE	0.1244	625	0.000199
Etapas 3	0.1480	806	0.000184
Etapas 4	0.1780	928	0.000192
Etapas 5	0.2946	978	0.000301
Etapas 6	0.6752	1143	0.000591

Tabla 5. Rigidez Efectiva

Elaborado por: Bernardo Medina

3.12.1 Energía de Disipación (E_M)

La energía de disipación es el resultado de obtener el área de la curva generada por cada etapa, este cálculo se lo puede realizar empleando cualquier método de geometría analítica básica. A continuación, se presentan los resultados de la energía de disipación en cada etapa del aislador.

Etapa	E_M (W)
DBE	50.00
MCE	99.00
Etapa 3	130.00
Etapa 4	144.00
Etapa 5	146.00
Etapa 6	154.00

Tabla 6. Energía de Disipación

Elaborado por: Bernardo Medina

3.12.2 Amortiguamiento Efectivo (β_M)

Se procede a calcular el amortiguamiento efectivo con la fórmula del ASCE 7-16, capítulo 17, fórmula (17.2-4)

$$\beta_M = \frac{\sum E_M}{2\pi \times k_M \times D_M^2}$$

Donde:

E_M = Energía de disipación

k_M = Rigidez efectiva

D_M = Desplazamiento asumido

$$\beta_M = \frac{50 (W)}{2\pi \times 0.000258 \left(\frac{kn}{kn} \right) \times 338^2 (mm)^2}$$

$$\beta_M = 0.269$$

De la misma forma se realizaría para las siguientes etapas, obteniendo los siguientes resultados

Etapa	V_b (kN/kN)	D (mm)	k_M (kN/mm/kN)	E_M (W)	β_M
DBE	0.0870	338	0.000258	50.00	0.269
MCE	0.1244	625	0.000199	99.00	0.203
Etapa 3	0.1480	806	0.000184	130.00	0.174
Etapa 4	0.1780	928	0.000192	144.00	0.139
Etapa 5	0.2946	978	0.000301	146.00	0.081
Etapa 6	0.6752	1143	0.000591	154.00	0.032

Tabla 7. Amortiguamiento Efectivo

Elaborado por: Bernardo Medina

3.12.3 Peso Efectivo de la Estructura

En la ficha técnica del aislador, debido a asuntos privados de la empresa, el fabricante no menciona el peso efectivo de la estructura con el que se ensayó para obtener los datos de período, sin embargo, si brinda los períodos en cada etapa, por esta razón con operaciones matemáticas básicas, se puede obtener el peso efectivo de la estructura. La fórmula a continuación pertenece al ASCE 7-16, fórmula (17.5-2).

$$T_M = 2\pi \times \sqrt{\frac{W}{k_M \times g}}$$

Donde:

T_M = Período efectivo

W = Peso efectivo de la estructura

k_M = Rigidez efectiva

g = Gravedad

El fabricante brinda los períodos efectivos para cada etapa, por esta razón se procede a despejar la fórmula:

$$W = \frac{T_M^2 \times k_M \times g}{4\pi^2}$$

Una vez despejada la fórmula se procede a calcular el peso, y se verifica que el peso es una constante

Etapa	T_M (s)	k_M (kn/mm/kn)	W (kN)
DBE	3.952	0.000258	97.4356
MCE	4.496	0.000199	97.268
Etapa 3	4.682	0.000184	97.531
Etapa 4	4.580	0.000192	97.386
Etapa 5	3.655	0.000301	97.231
Etapa 6	2.609	0.000591	97.275

Tabla 8. *Peso efectivo ensayado del fabricante*

Elaborado por: Bernardo Medina

Se obtiene el promedio de los pesos para utilizarlo como un dato fijo:

$$W = 97.354 \text{ kN}$$

3.13 Curva del espectro de respuesta modal reducida

Una vez que ya se tenga el aislador, se procede a calcular la curva de espectro de respuesta modal espectral de la estructura aislada; primeramente, se debe calcular el espectro elástico de diseño que propone la NEC -2015, este espectro se lo debe dividir para el factor de resistencia que propone el FEMA-450, que para estructuras aisladas independientemente de cuál sea su configuración estructural, R tiene un valor de 2. (Fenz & Constantinou, 2008)

Con los datos proporcionados por el fabricante, se procede a obtener el valor del amortiguamiento efectivo, y con el dato del amortiguamiento efectivo, se procede a calcular el factor de reducción que tendrá la estructura aislada. A continuación, se presenta la ecuación y el cálculo del factor de reducción mencionado anteriormente:

$$\beta = \left(\frac{\beta_{eff}}{0.05} \right)^{0.03}$$

Donde:

β_{eff} = Amortiguamiento efectivo

$$\beta = \left(\frac{0.27}{0.05} \right)^{0.3}$$

$$\beta = 1.66$$

Se recomienda que el espectro analizado anteriormente debe ser reducido el momento en que el período es 0.8 veces T_D , que en este caso T_D es el periodo efectivo proporcionado por el fabricante cuyo valor es 3.95s. (Fenz & Constantinou, 2008)

Dado que el período efectivo es $0.8 * T_D$. Se obtiene lo siguiente:

$$0.8 \times 3.95 = 3.16$$

A continuación, se muestra el espectro de respuesta modal reducido.

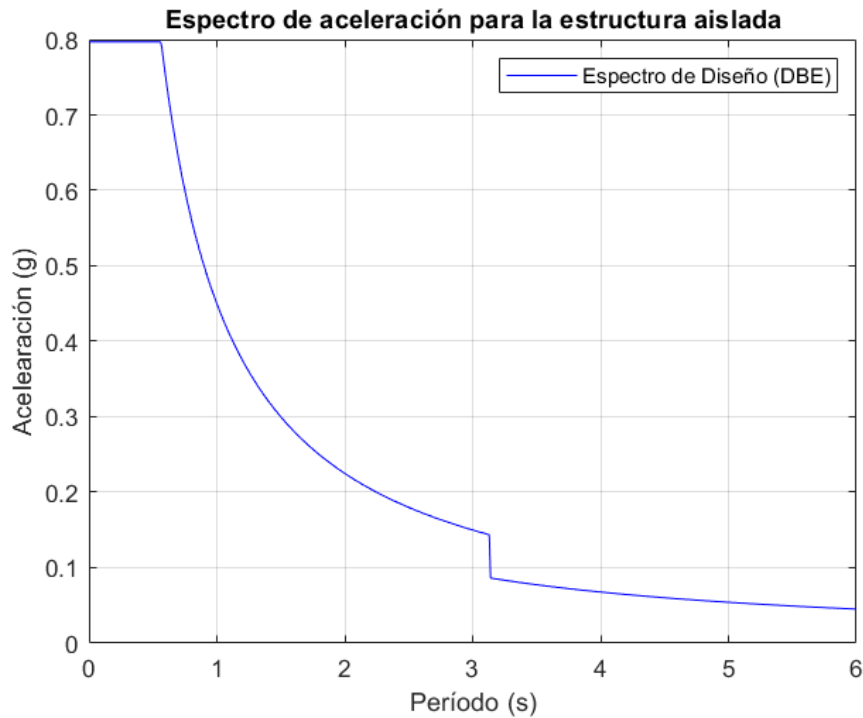


Fig. 31. Espectro de respuesta modal reducido

3.14 Modelo matemático para la generación de la curva de histéresis en Matlab

Se ha generado un modelo matemático en base a los cálculos de los ciclos y etapas mostradas anteriormente. El objetivo de la rutina que se muestra a continuación es automatizar el proceso descrito en la sección anterior. Adicionalmente, se podrán manipular los datos de entrada, con el fin de crear distintos modelos que serán comparados y contrastados para su posterior análisis. Cabe recalcar que la rutina llama a un documento de Excel cuyo nombre es “Datos”, esta hoja de Excel contiene los datos de entrada para realizar la curva, a continuación, se muestra la hoja de Excel con la información indicada.

0.01	0.03	0.06	432	4058	7684	338	50	0.087	3.952	0.269	0.000258
0.01	0.03	0.06	432	4058	7684	625	99	0.1244	4.496	0.203	0.000199
0.01	0.03	0.06	432	4058	7684	806	130	0.148	4.682	0.174	0.000184
0.01	0.03	0.06	432	4058	7684	928	144	0.178	4.58	0.139	0.000192
0.01	0.03	0.06	432	4058	7684	978	146	0.2946	3.655	0.081	0.000301
0.01	0.03	0.06	432	4058	7684	1143	154	0.6752	2.609	0.032	0.000591

Fig. 32. Datos de entrada en hoja de Excel

3.15 Rutina en Matlab

```
clc;
clear;
filename = 'Datos.xlsx';
A = xlsread(filename);
X1=A(1:6,7);
Y=A(1:6,9);
Y11=A(1,9);
Y1w1=[A(2:6,9)-(A(2:6,1)*2)];
Y1=[Y11;Y1w1];
PX1=X1*-1;
PY1=Y1*-1;
PX2=X1;
PY2=Y1-A(1:6,1);
PX3=PX1;
PY3=PY2*-1;
PX4=PX2-((A(1:6,8)).*(A(1:6,11)));
PY4=PY2-(A(1:6,2));
PX5=PX4*-1;
PY5=PY4*-1;
PX6=abs(X1-(A(1:6,4)));
PY6=PY4-(A(1:6,3));
PX7=PX6*-1;
PY7=PY6*-1;
DBEX=[0; X1(1);PX2(1);PX4(1);PX6(1);PX1(1);PX3(1);PX5(1);PX7(1);X1(1)];
DBEY=[A(1,1);
Y(1);PY2(1);PY4(1);PY6(1);PY1(1);PY3(1);PY5(1);PY7(1);Y(1)];
MCEX=[X1(2);PX2(2);PX4(2);PX6(2);PX1(2);PX3(2);PX5(2);PX7(2);X1(2)];
MCEY=[Y1w1(1);PY2(2);PY4(2);PY6(2);PY1(2);PY3(2);PY5(2);PY7(2);Y1w1(1)];
Stg3X=[X1(3);PX2(3);PX4(3);PX6(3);PX1(3);PX3(3);PX5(3);PX7(3);X1(3)];
Stg3Y=[Y1w1(2);PY2(3);PY4(3);PY6(3);PY1(3);PY3(3);PY5(3);PY7(3);Y1w1(2)];
Stg4X=[X1(4);PX2(4);PX4(4);PX6(4);PX1(4);PX3(4);PX5(4);PX7(4);X1(4)];
Stg4Y=[Y1w1(3);PY2(4);PY4(4);PY6(4);PY1(4);PY3(4);PY5(4);PY7(4);Y1w1(3)];
Stg5aX=[PX2(4);X1(4);X1(5);PX2(5);PX2(4)];
Stg5aY=[PY2(4);Y1w1(3);Y1w1(4);PY2(5);PY2(4)];
Stg5bX=Stg5aX*-1;
Stg5bY=Stg5aY*-1;
Stg6aX=[X1(5);PX2(5);X1(6);PX2(6);X1(5)];
Stg6aY=[Y1w1(4);PY2(5);Y1w1(5);PY2(6);Y1w1(4)];
Stg6bX=Stg6aX*-1;
Stg6bY=Stg6aY*-1;
```

La rutina descrita anteriormente se presentará en su totalidad en la sección de anexos al final del documento.

A continuación, se muestra la curva de histéresis realizada en Matlab:

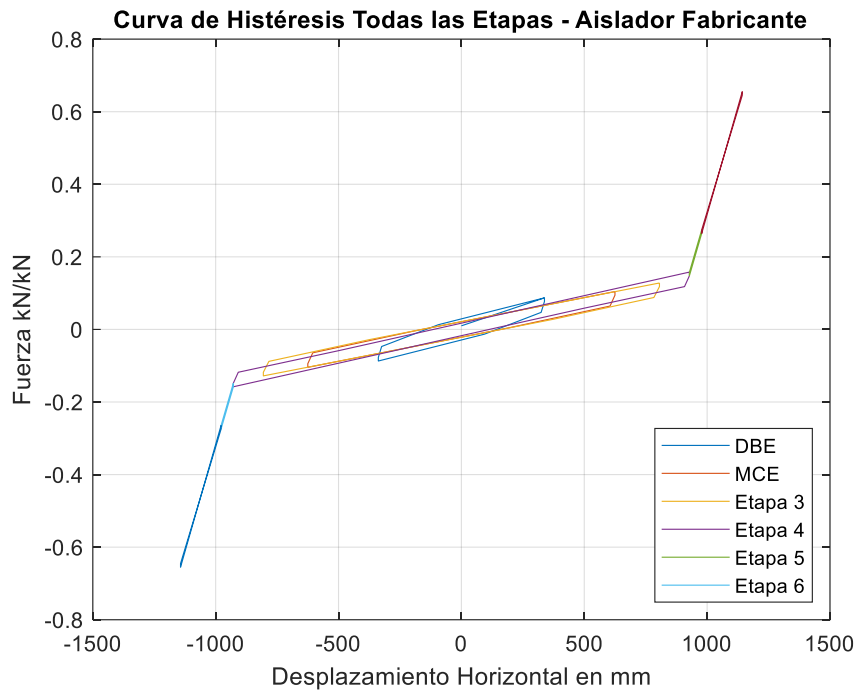


Fig. 33. Curva de histéresis en Matlab – Aislador fabricante

3.16 Aisladores a analizar

A continuación, se muestran los aisladores que se utilizarán en los distintos modelos, adicional se presentan las variaciones generadas en cada uno de ellos. Es importante mencionar que se han colocado 33 aisladores en la base del edificio y para cada modelo se ocupa el mismo aislador en todo el edificio.

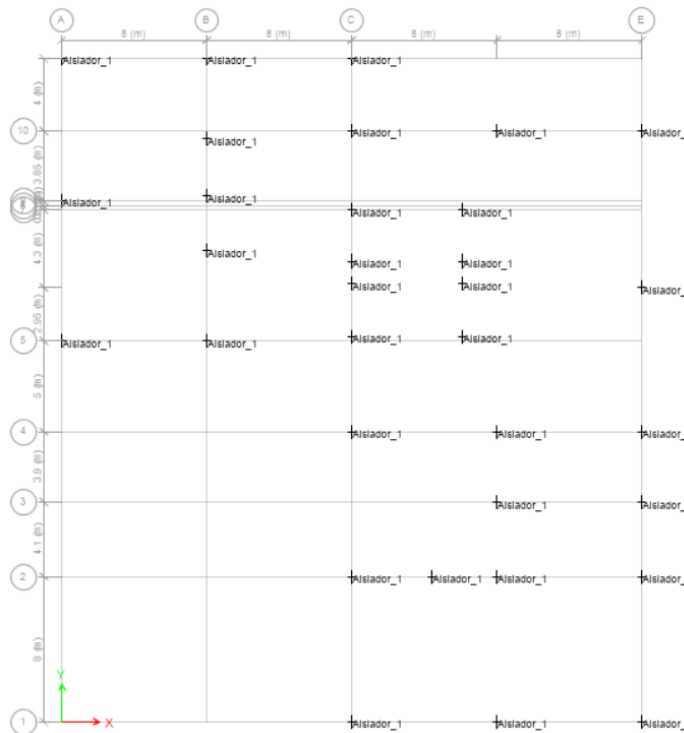


Fig. 34. Distribución de Aisladores en la base

Aislador 1: Modelo 1

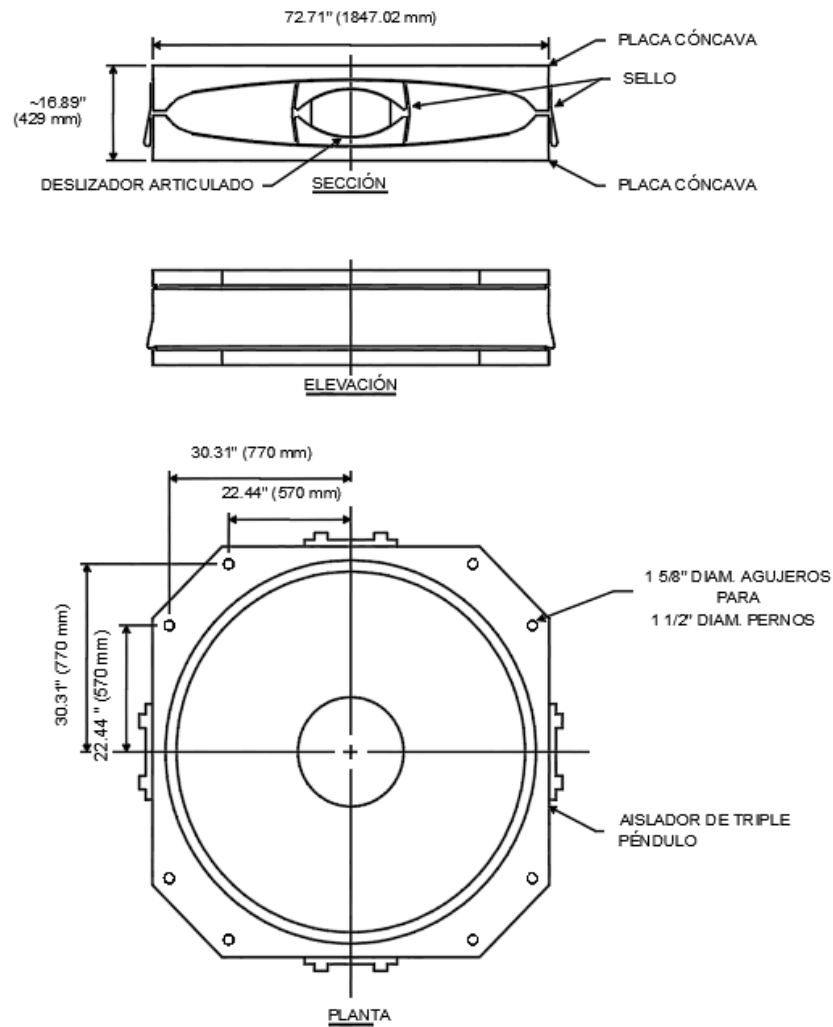


Fig. 35. Aislador 1, Modelo 1

Modelo 1	
Rigidez en sentido U1 (kip/in)	16.79
Rigidez en sentido U2 y U3 (kip/in)	4.48
Amortiguamiento Efectivo (%)	27
Rigidez No Lineal	22.39
Radio superficie de deslizamiento del aislador (in)	_ Inner top: 12 in _ Outer top: 156 in

3.17 Curva de Histéresis Modelo 1, Etapa 3

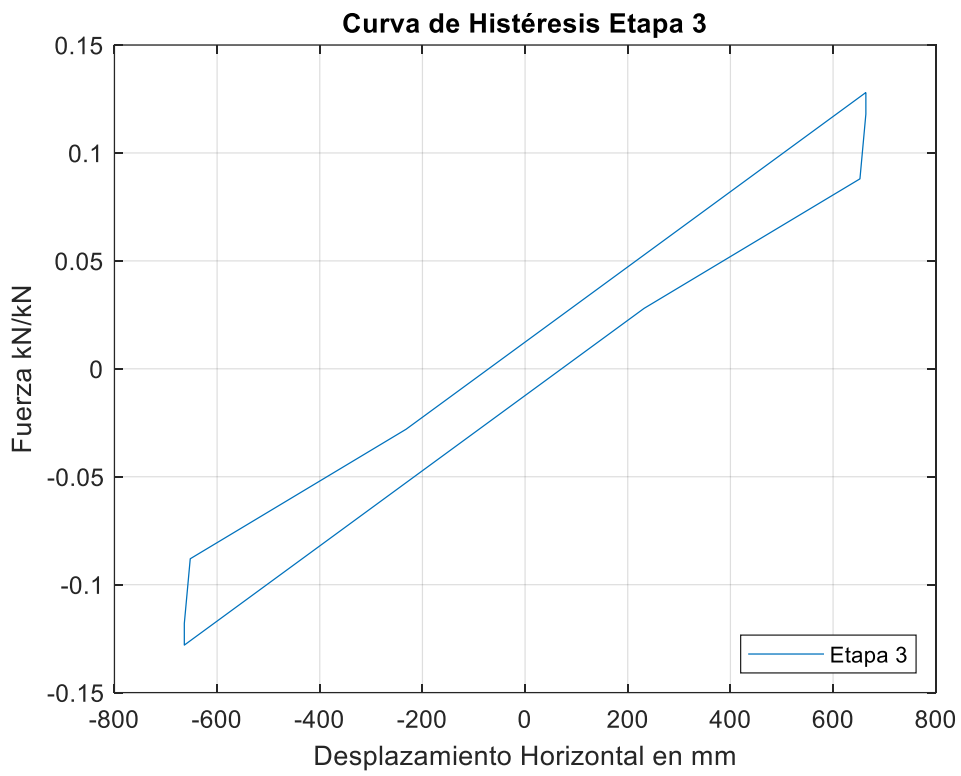


Fig. 36. Aislador 1, Modelo 1, Etapa 3

3.17.1 Curva de Histéresis Modelo 1

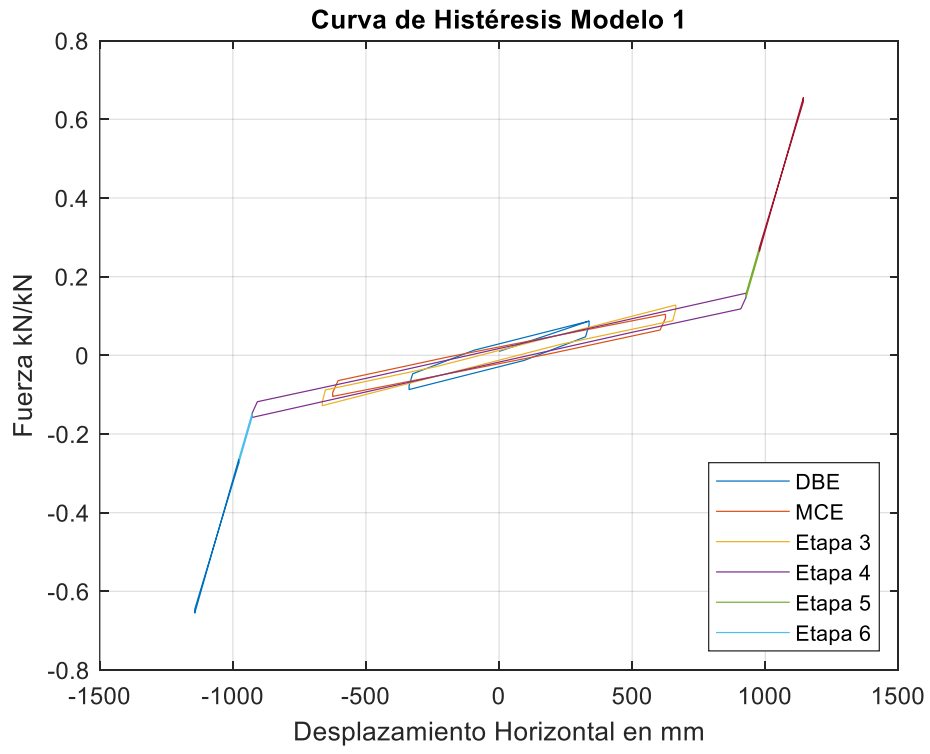


Fig. 37. Curva de Histéresis, Aislador 1, Modelo 1

Aislador 2: Modelo 2

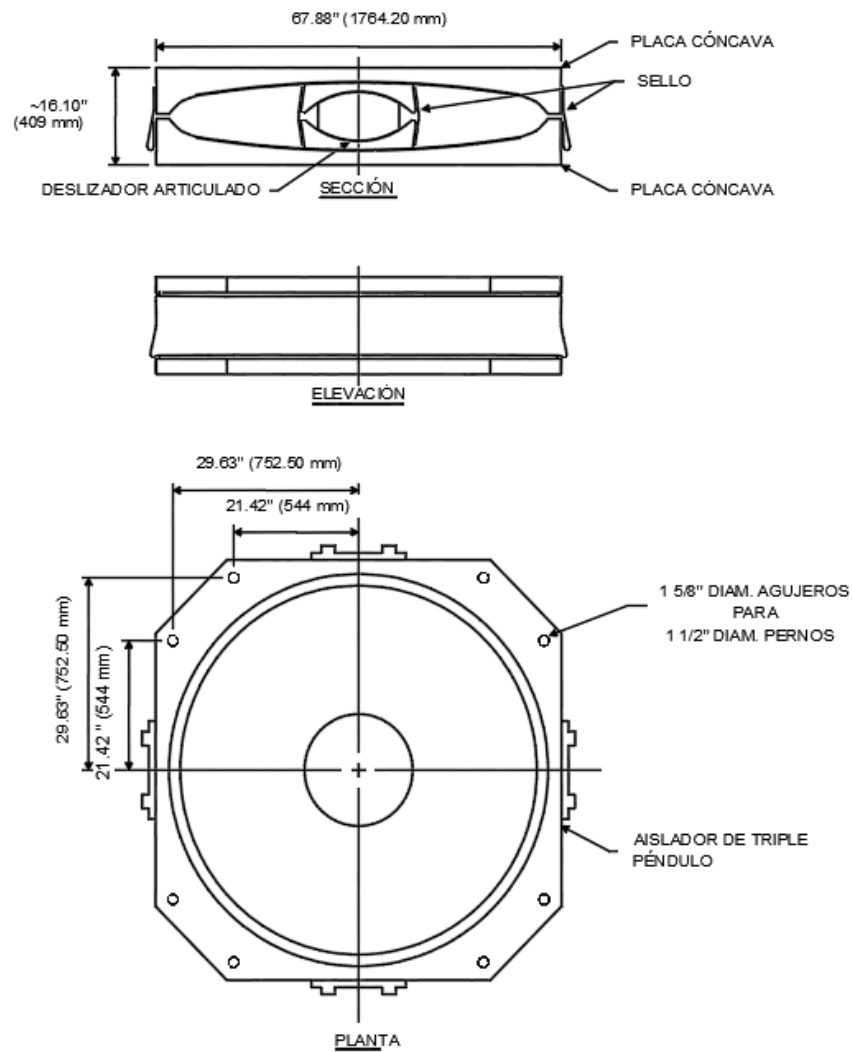


Fig. 38. Aislador 2, Modelo 2

Modelo 2	
Rigidez en sentido U1 (kip/in)	36.39
Rigidez en sentido U2 y U3 (kip/in)	13.99
Amortiguamiento Efectivo (%)	24
Rigidez No Lineal	29.39
Radio superficie de deslizamiento del aislador (in)	_ Inner top: 10 in _ Outer top: 140 in

Tabla 10. Aislador 2, Modelo 2

3.18 Curva de Histéresis Modelo 2, Etapa 3

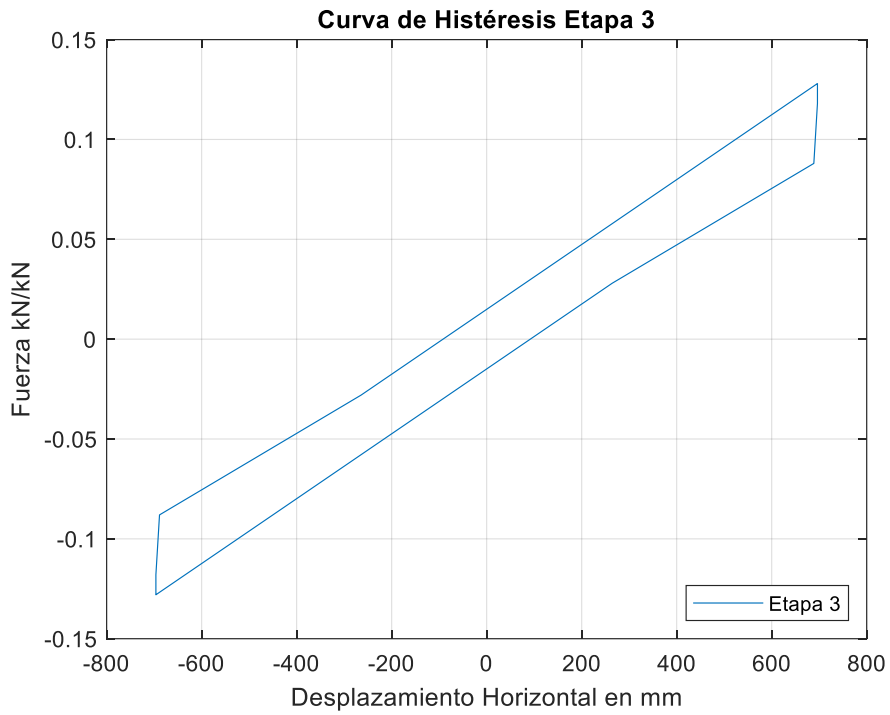


Fig. 39. Curva de Histéresis, Aislador 2, Modelo 2, Etapa 3

3.18.1 Curva de Histéresis Modelo 2

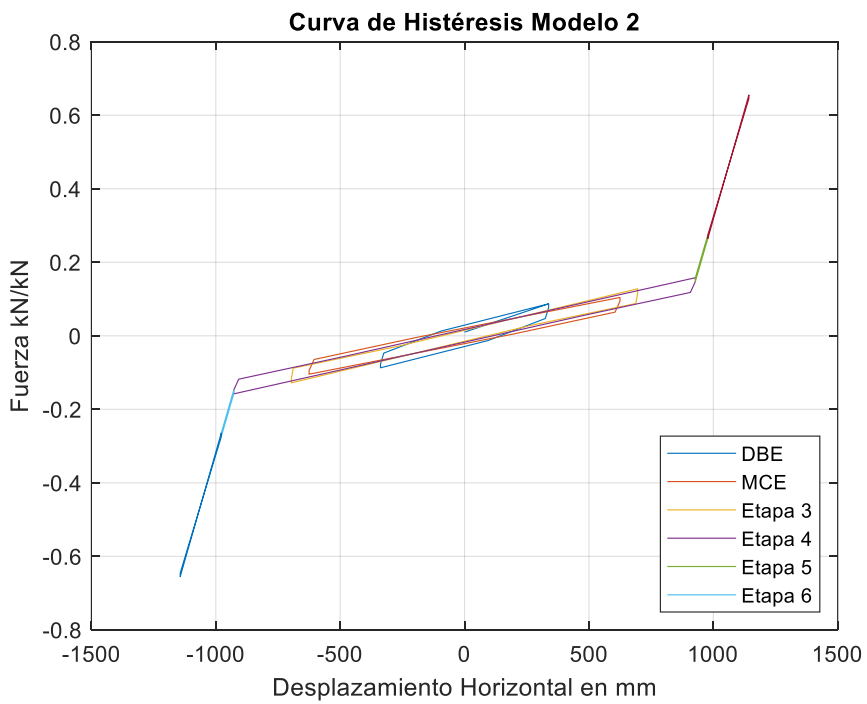


Fig. 40. Curva de Histéresis, Aislador 2, Modelo 2

Aislador 3: Modelo 3

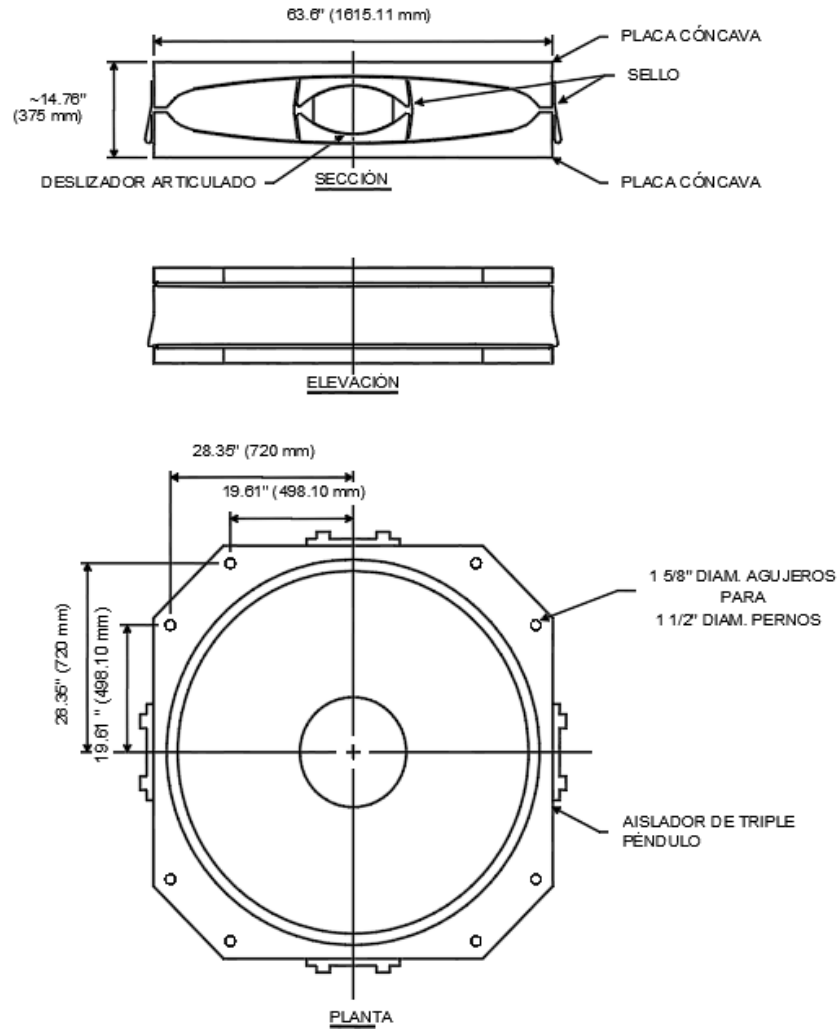


Fig. 41. Aislador 3, Modelo 3

Modelo 3	
Rigidez en sentido U1 (kip/in)	44.79
Rigidez en sentido U2 y U3 (kip/in)	22.39
Amortiguamiento Efectivo (%)	15
Rigidez No Lineal	41.99
Radio superficie de deslizamiento del aislador (in)	_ Inner top: 8 in _ Outer top: 130 in

Tabla 11. Aislador 3, Modelo 3

3.19 Curva de Histéresis Modelo 3, Etapa 3

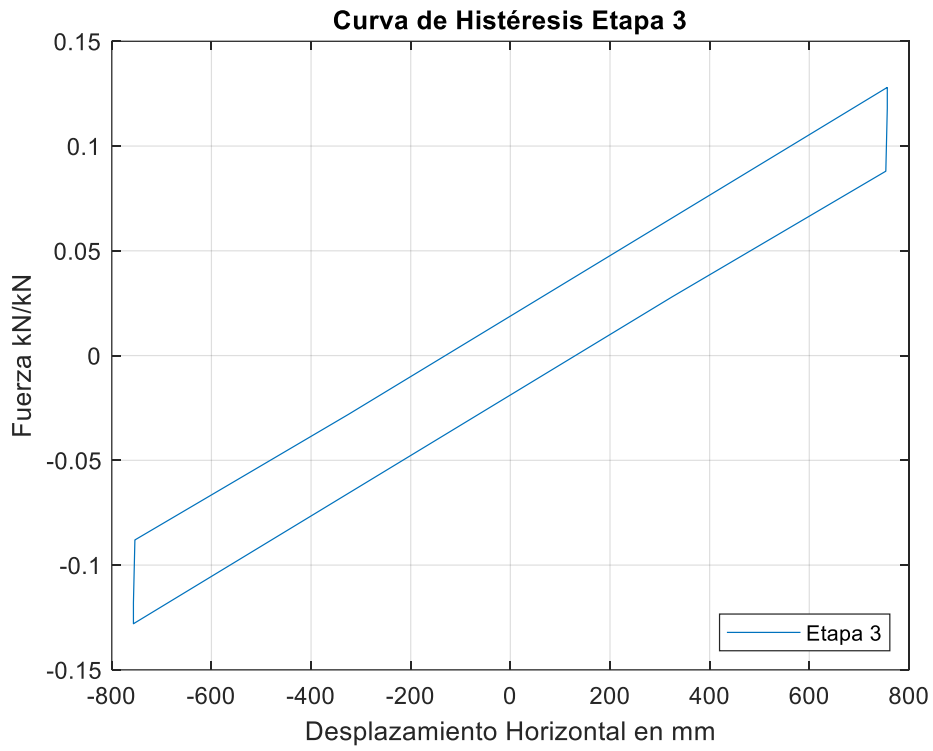


Fig. 42. Aislador 3, Modelo 3, Etapa 3

3.19.1 Curva de Histéresis Modelo 3

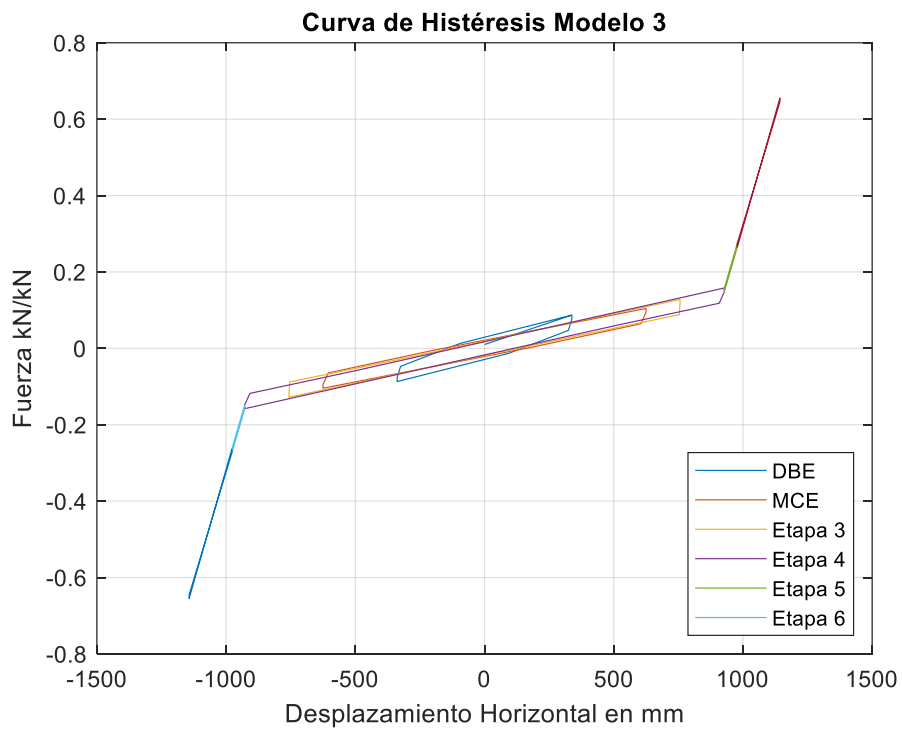


Fig. 43. Curva de Histéresis, Aislador 3, Modelo 3

3.20 Análisis Tiempo Historia: Base aislada Modelo 1

En esta sección se presentarán las derivas, cortantes y desplazamientos de la estructura aislada, con referencia a los registros sísmicos obtenidos de una curva de análisis modal reducido debido al aislador. Los registros se los obtuvo de la página del PEER.

A continuación, se procederá a calcular el período efectivo con los datos del aislador:

$$W = 6.83 \text{ kips}$$

$$k_M = 5.59 \text{ kips/in}$$

$$g = 386.22 \text{ in/s}^2$$

$$T_{eff} = 2\pi \sqrt{\frac{W}{k_M * g}} = 3.46 \text{ s}$$

$$T_{eff} = 3.46 \text{ s}$$

A continuación, se procede a calcular el 80% de T_{eff} .

$$0.8 * T_{eff} = 2.768 \text{ s}$$

De acuerdo a la información del aislador FPS considerado, el valor de B_d es igual a 1.66, por lo tanto, se divide el espectro modal considerado para este valor, en el segundo en el que la gráfica se encuentra en 2.82 segundos.

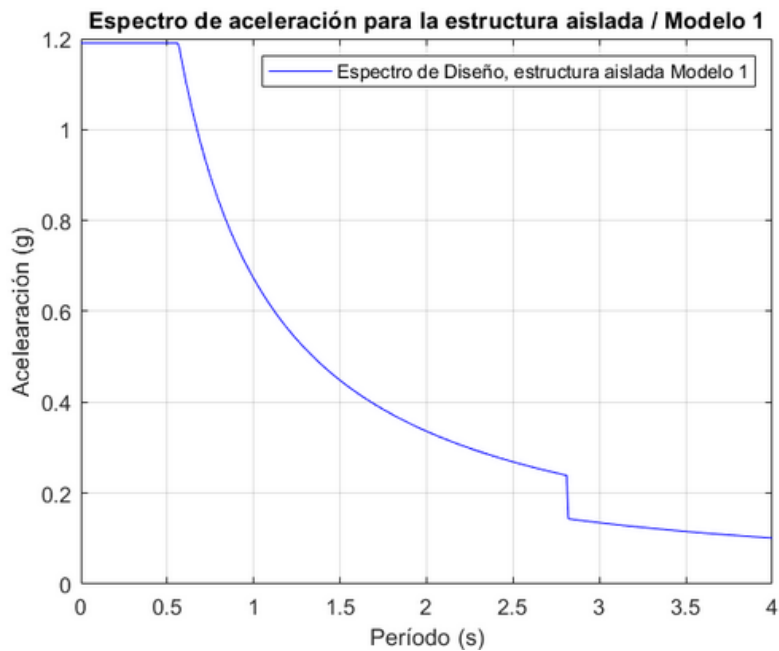


Fig. 44. Espectro de aceleración estructura aislada Modelo 1

3.20.1 Selección de registros, Modelo 1

A continuación, se procede a introducir el espectro calculado en la página del PEER, con el objetivo de encontrar registros que servirán para realizar el Análisis Tiempo Historia y comparar los resultados de la estructura típica, con la de aisladores. Es importante mencionar que la página del PEER se encarga de buscar registros que se ajusten al espectro de respuesta ingresado.

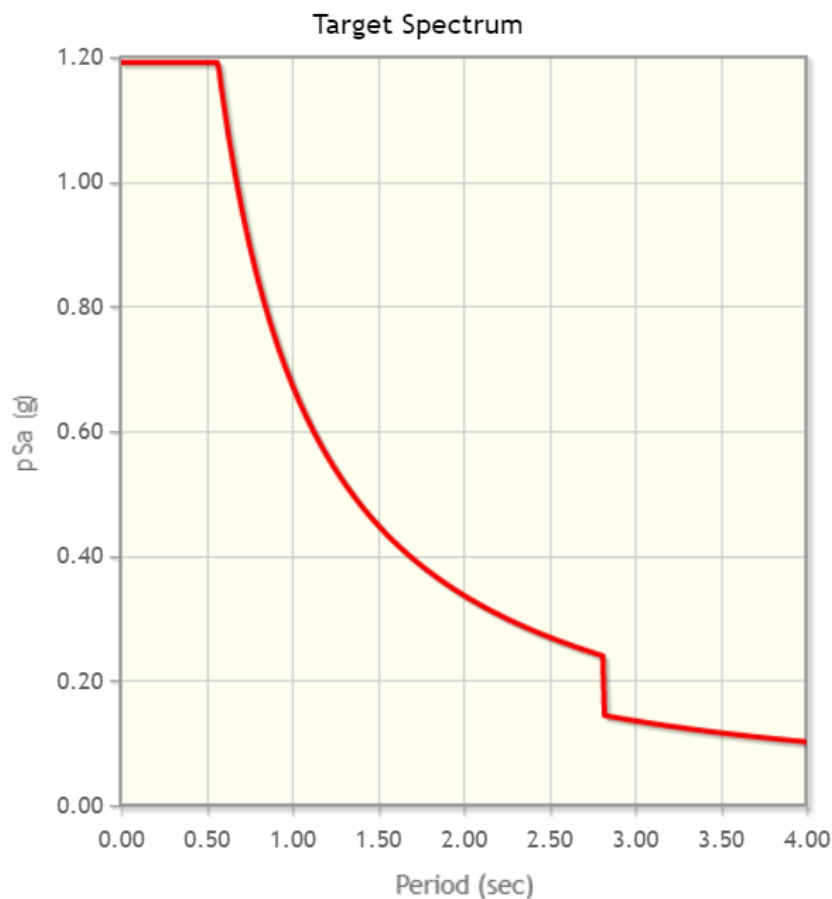


Fig. 45. Espectro a ingresar al PEER, Modelo 1

3.20.2 Registros Estructura Aislada Modelo 1

A continuación, se presentan los 11 registros escalados en sus tres direcciones, obtenidos de la página del PEER.

3.20.2.1 Registros en la componente Norte – Sur

A continuación, se presentan los 11 registros requeridos en la componente norte – sur.

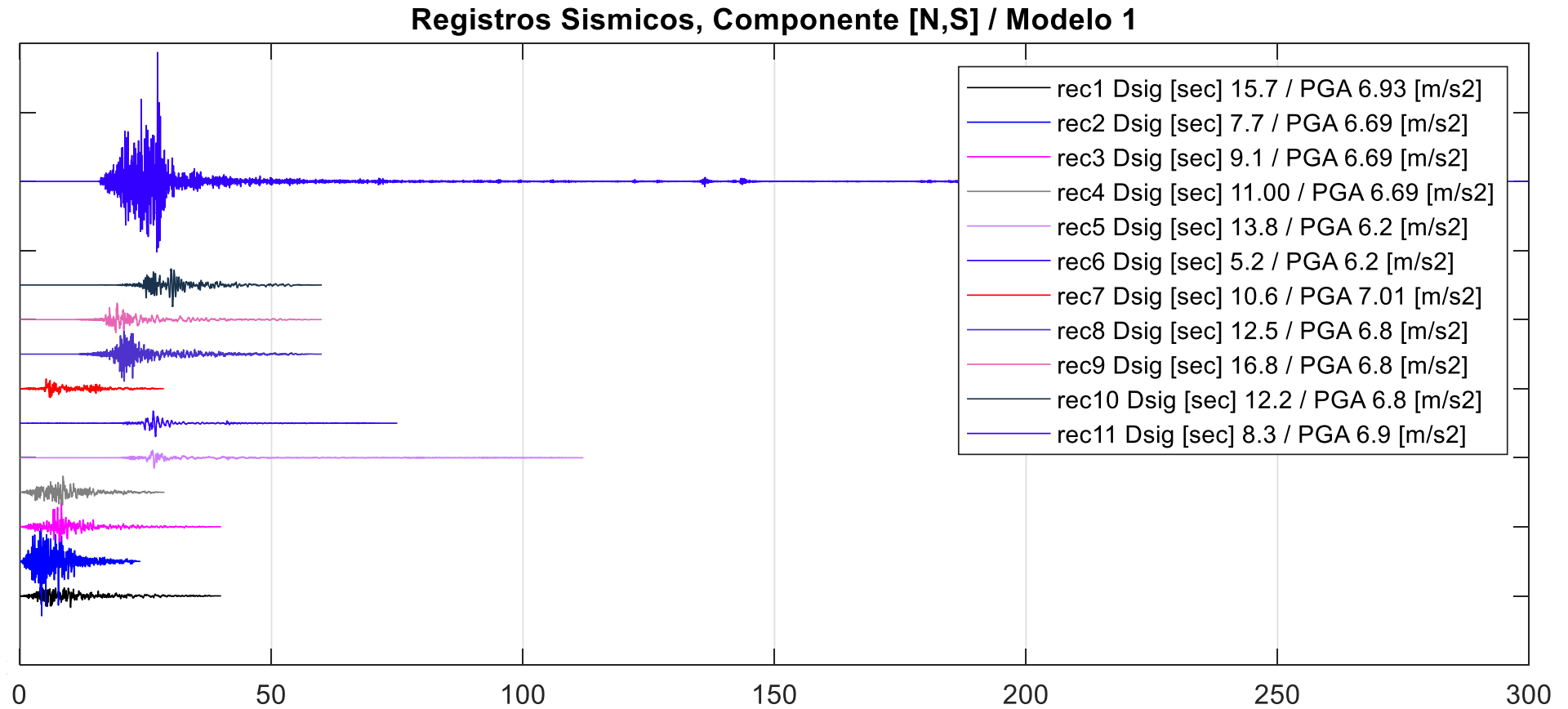


Fig. 46. Registros Sísmicos, Componente [N, S] / Modelo 1

3.20.2.2 Registros en la componente Este – Oeste

A continuación, se presentan los 11 registros requeridos en la componente este – oeste.

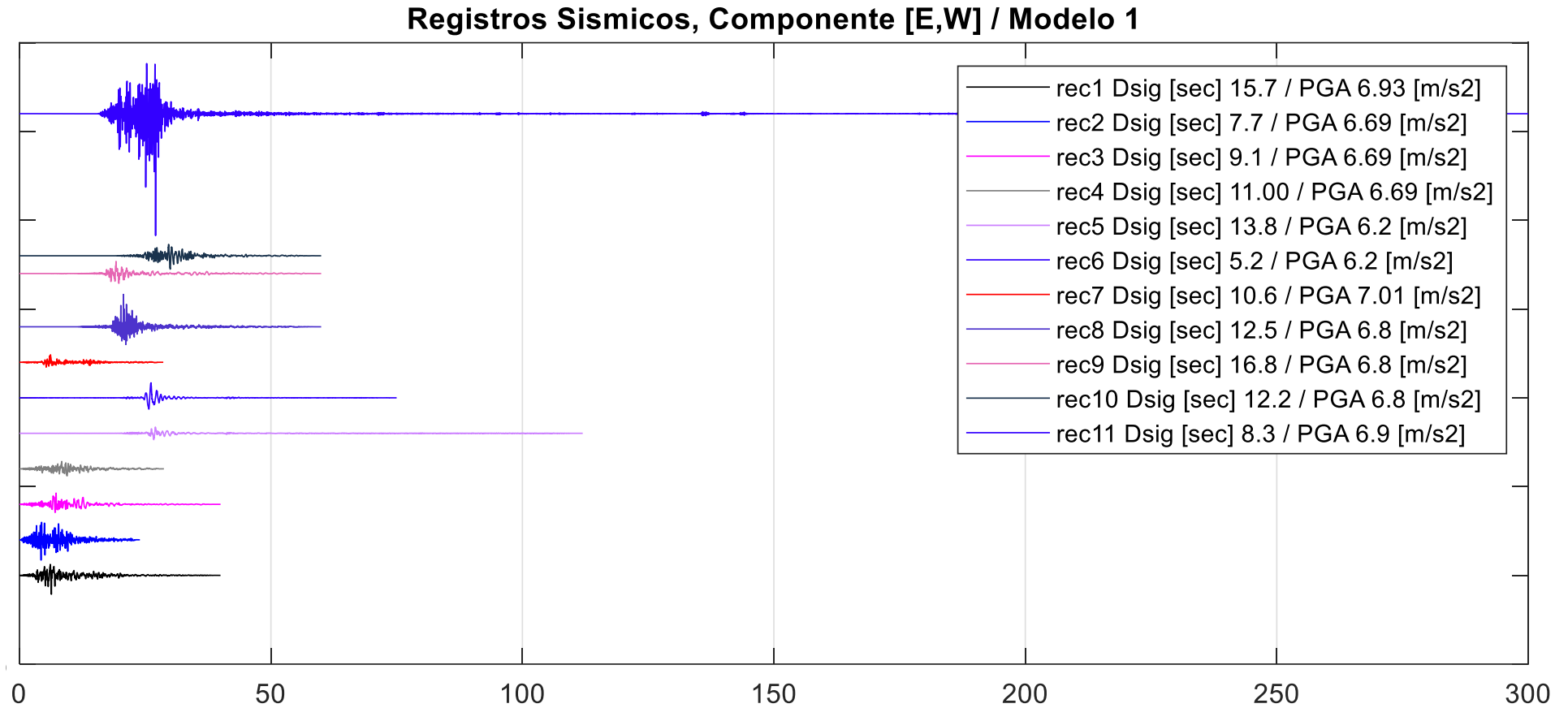


Fig. 47. Registros Sísmicos, Componente [E, W] / Modelo 1

3.20.2.3 Registros en la componente Vertical

A continuación, se presentan los 11 registros requeridos en la componente vertical.

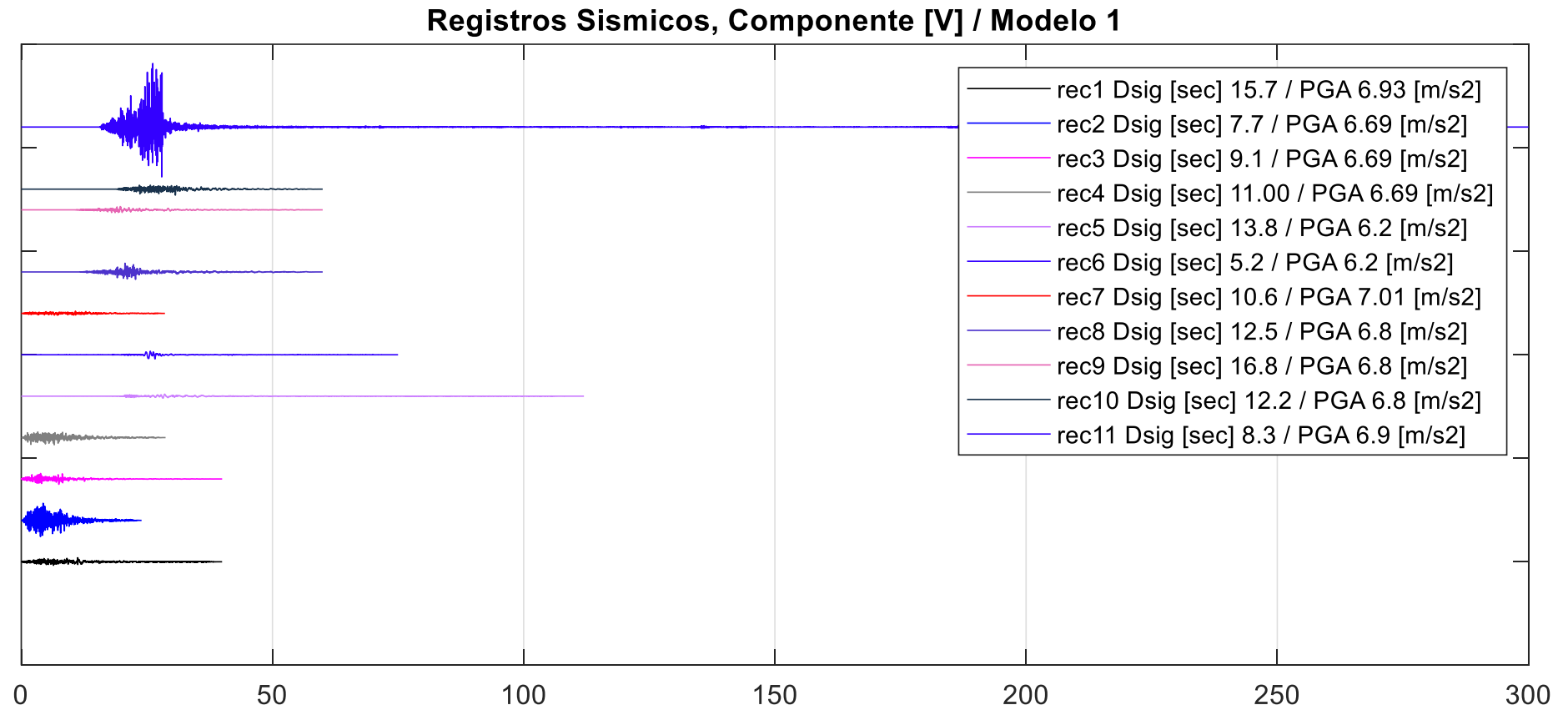


Fig. 48. Registros Sísmicos, Componente [V] / Modelo 1

3.21 Deriva inelástica de piso (11 registros / Análisis tiempo historia / Modelo 1)

A continuación, se muestran las derivas de piso que son el resultado de los 11 registros cargados en el programa, adicionalmente se señala su envolvente.

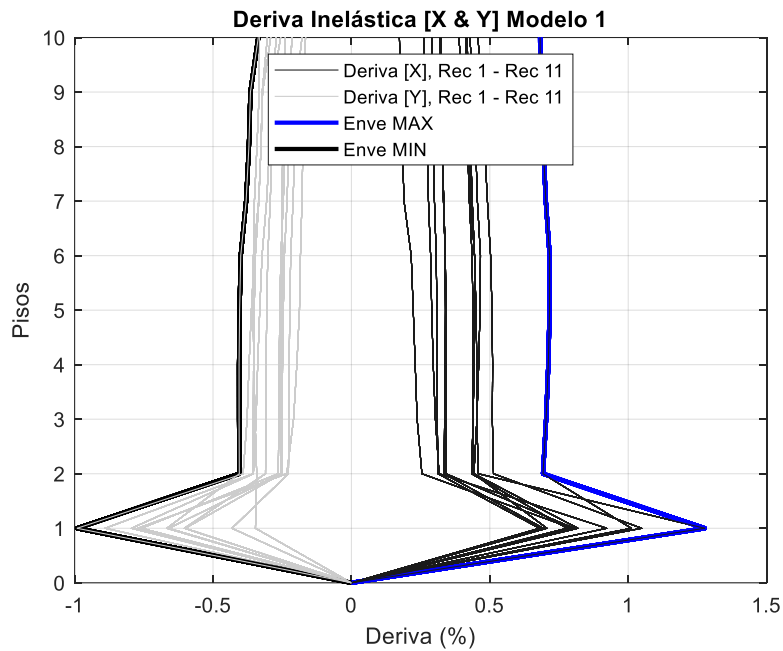


Fig. 49. Deriva, Análisis Tiempo Historia, Modelo 1

3.21.1 Cortante inelástico de piso (11 registros / Análisis tiempo historia / Modelo 1)

A continuación, se muestran los cortantes de piso que son el resultado de los 11 registros cargados en el programa, adicionalmente se señala su envolvente.

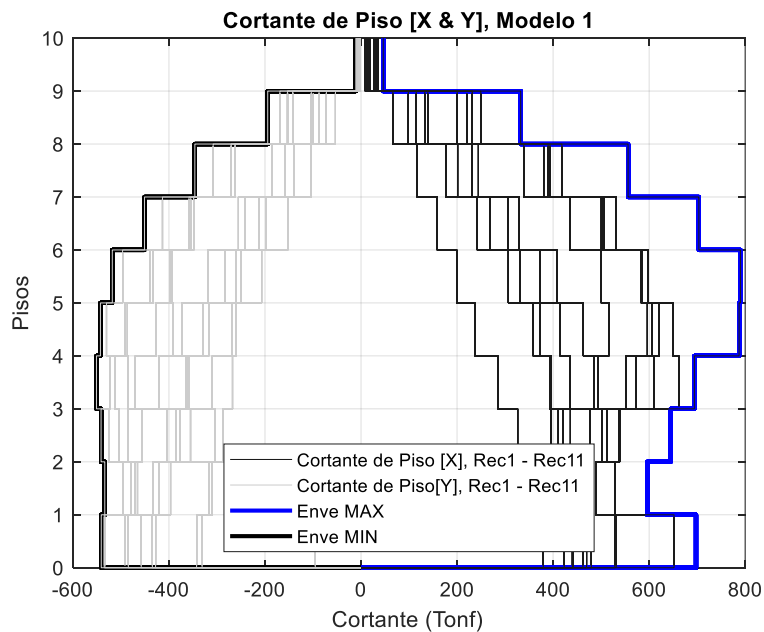


Fig. 50. Cortante, Análisis Tiempo Historia, Modelo 1

3.21.2 Desplazamiento inelástico de piso (11 registros / Análisis tiempo historia / Modelo 1)

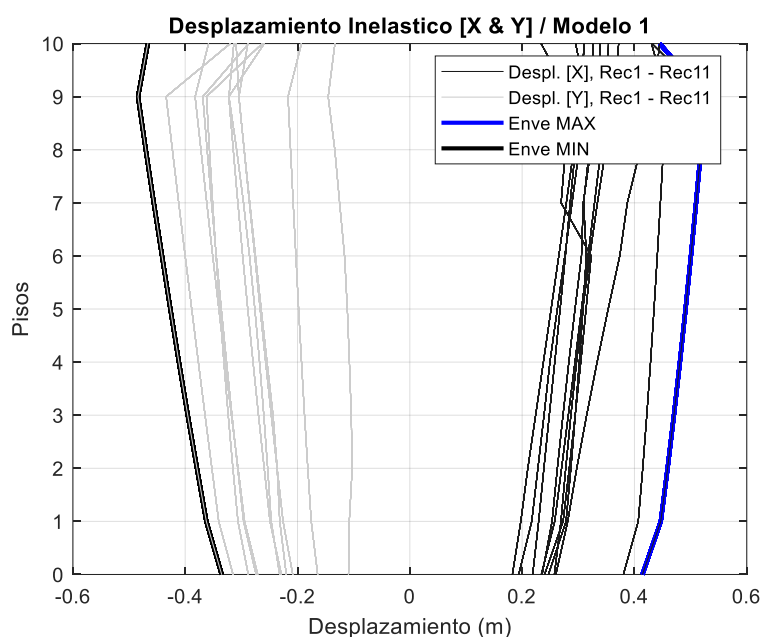


Fig. 51. Desplazamiento, Análisis Tiempo Historia, Modelo 1

A continuación, se muestran los desplazamientos de piso que son el resultado de los 11 registros cargados en el programa, adicionalmente se señala su envolvente.

3.22 Análisis Tiempo Historia: Base aislada Modelo 2

Tal como se realizó en el modelo 1, el objetivo de esta sección será de calcular las derivas cortantes y desplazamientos de la estructura, sin embargo, se debe tener en cuenta que, para que cada modelo sea distinto, se modificarán las características del aislador de tal manera que se puedan verificar las variaciones de acuerdo a parámetros tales como el período de la estructura, derivas, fuerza cortante y desplazamiento de piso.

Cabe recalcar que, debido a los cambios antes mencionados, el período de la estructura pasó de tener 3.67 segundos a 2.95 segundos.

A continuación, se procederá a calcular el período efectivo con los parámetros modificados del aislador:

$$W = 6.83 \text{ kips}$$

$$k_M = 13.99 \text{ kips/in}$$

$$g = 386.22 \text{ in/s}^2$$

$$T_{eff} = 2\pi \sqrt{\frac{W}{k_M * g}} = 3.19 \text{ s}$$

A continuación, se procede a calcular el 80% de T_{eff} .

$$0.8 * T_{eff} = 2.56 \text{ s}$$

De acuerdo a la ecuación:

$$\beta d = \left(\frac{0.24}{0.05}\right)^{0.3}$$

$$\beta d = 1.60$$

El valor de βd es igual a 1.6, por lo tanto, se divide el espectro modal considerado para este valor, en el segundo en el que la gráfica se encuentra en 2.56 segundos.

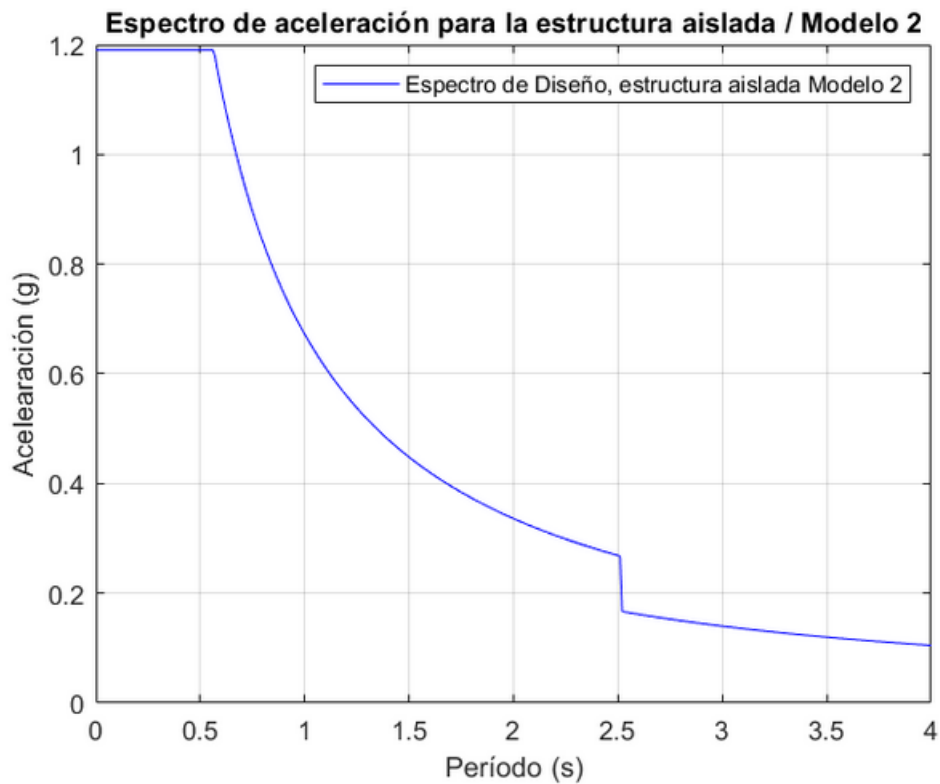


Fig. 52. Espectro de aceleración estructura aislada Modelo 2

3.23 Selección de registros, Modelo 2

De la misma manera que en el modelo 1, se procede a introducir el espectro de respuesta en la página del PEER para obtener los registros que se ajustan a las características del modelo 2.

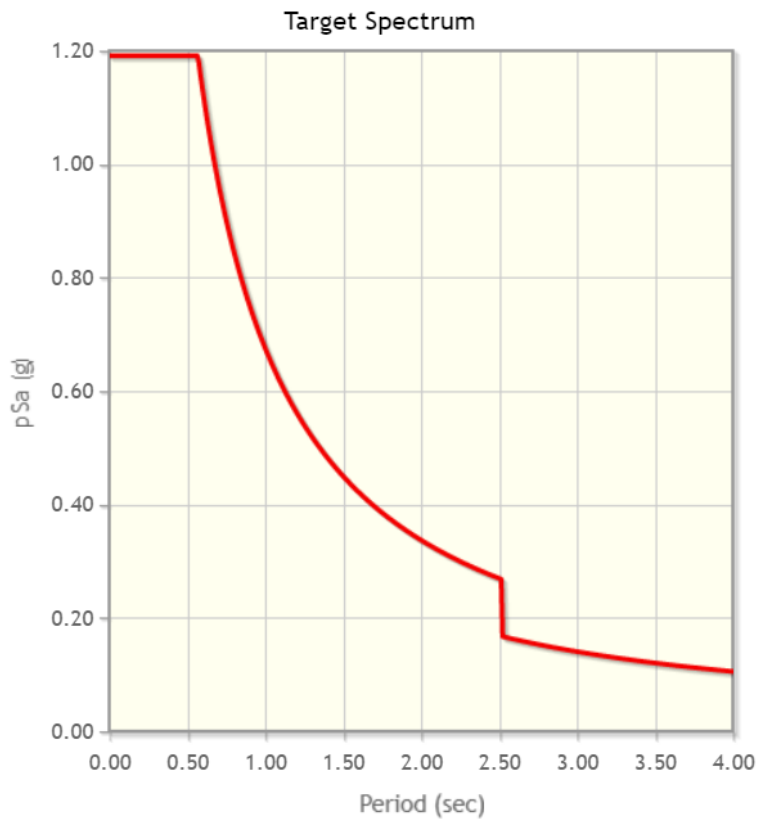


Fig. 53. Espectro a ingresar al PEER, Modelo 2

3.23.1 Registros Estructura Aislada Modelo 2

A continuación, se presentan los 11 registros escalados en sus tres direcciones, obtenidos de la página del PEER.

3.23.1.1 Registros en la componente Norte – Sur

A continuación, se presentan los 11 registros requeridos en la componente norte – sur.

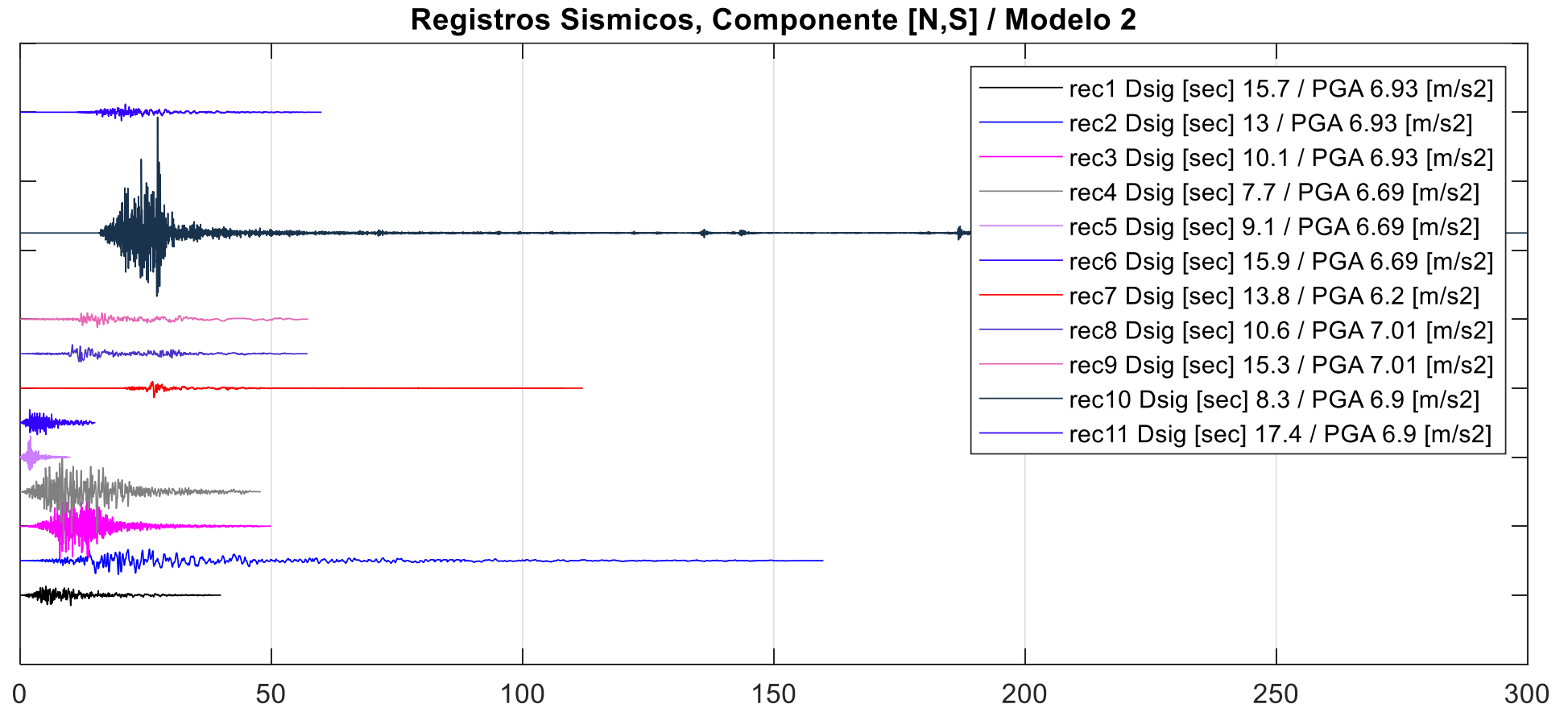


Fig. 54. Registros Sísmicos, Componente [N, S] / Modelo 2

3.23.1.2 Registros en la componente Este – Oeste

A continuación, se presentan los 11 registros requeridos en la componente este – oeste.

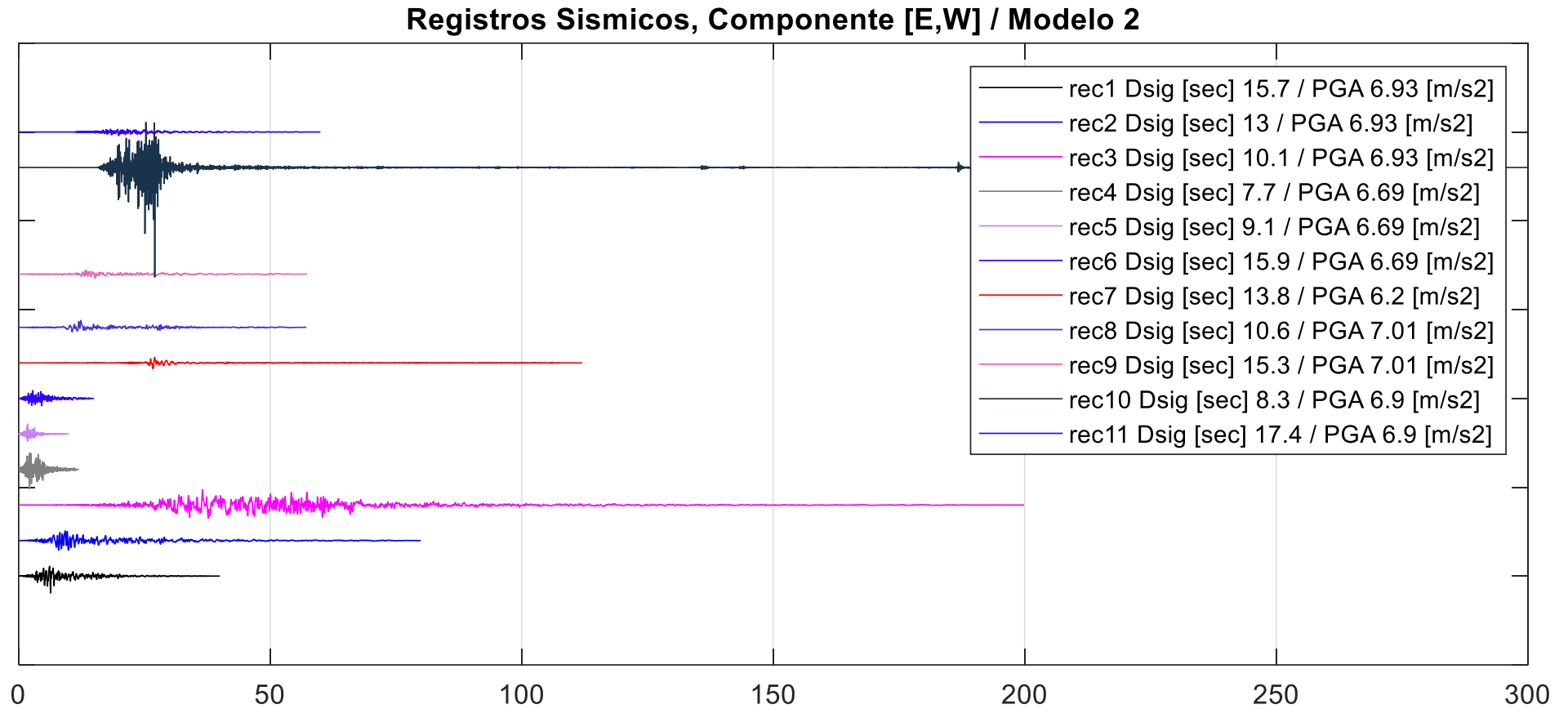


Fig. 55. Registros Sísmicos, Componente [E, W] / Modelo 2

3.23.1.3 Registros en la componente Vertical

A continuación, se presentan los 11 registros requeridos en la componente vertical.

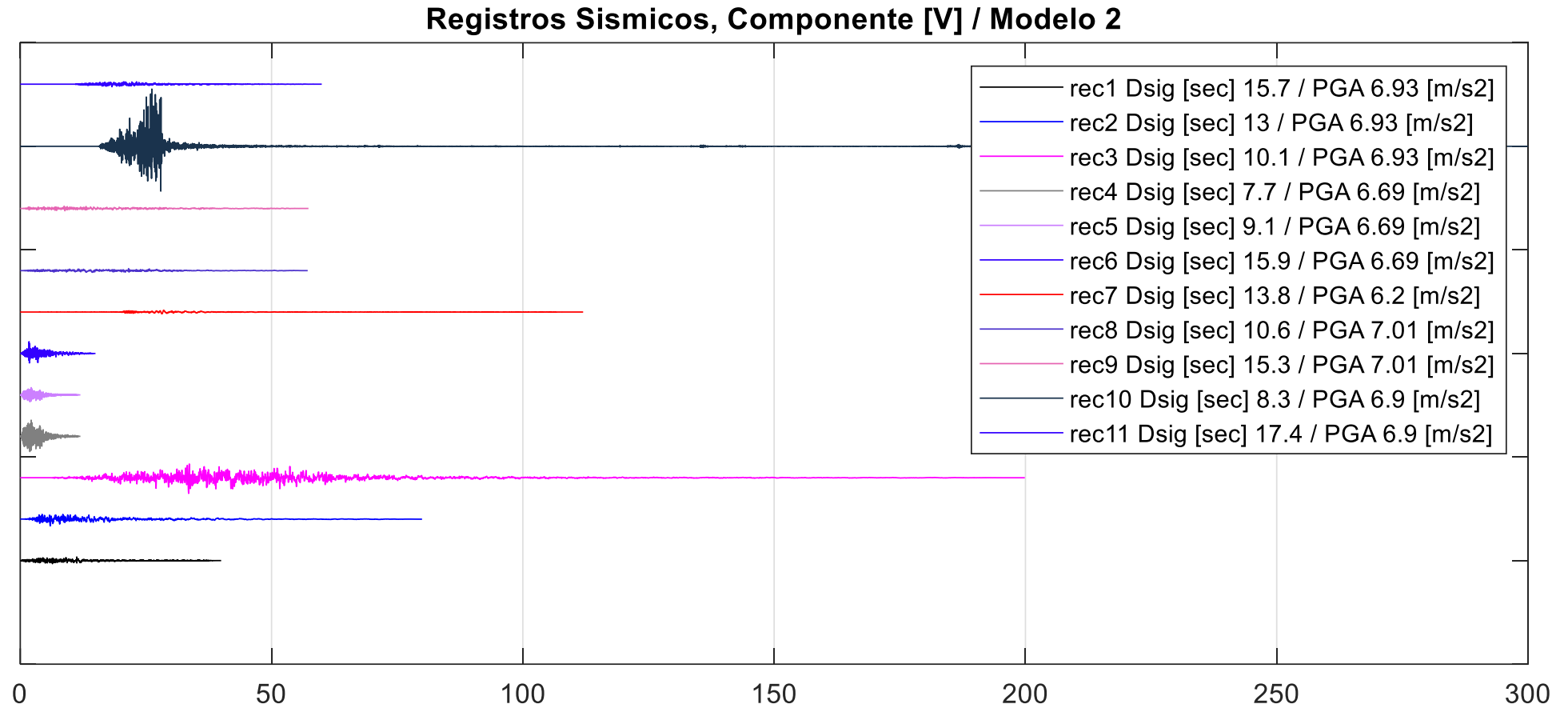


Fig. 56. Registros Sísmicos, Componente [V] / Modelo 2

3.24 Deriva inelástica de piso (11 registros / Análisis tiempo historia / Modelo 2)

A continuación, se muestran las derivas de piso que son el resultado de los 11 registros cargados en el programa, adicionalmente se señala su envolvente.

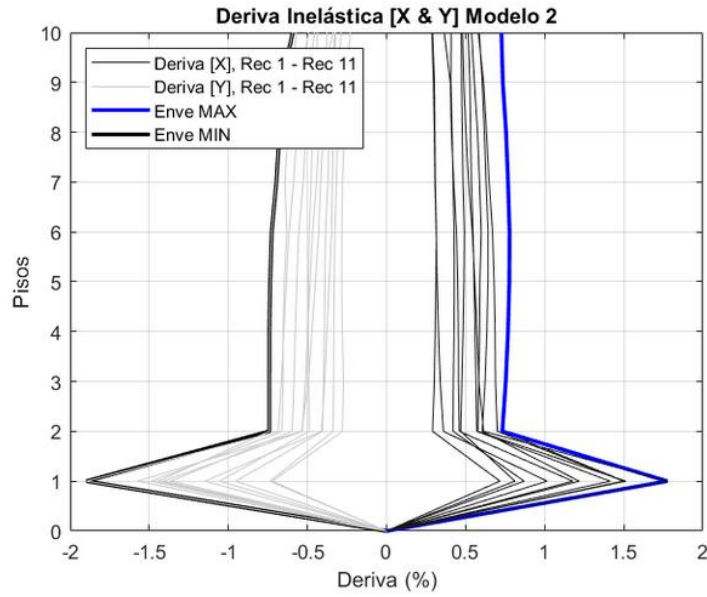


Fig. 57. Deriva, Análisis Tiempo Historia, Modelo 2

3.24.1 Cortante inelástico de piso (11 registros / Análisis tiempo historia / Modelo 2)

A continuación, se muestran los cortantes de piso que son el resultado de los 11 registros cargados en el programa, adicionalmente se señala su envolvente.

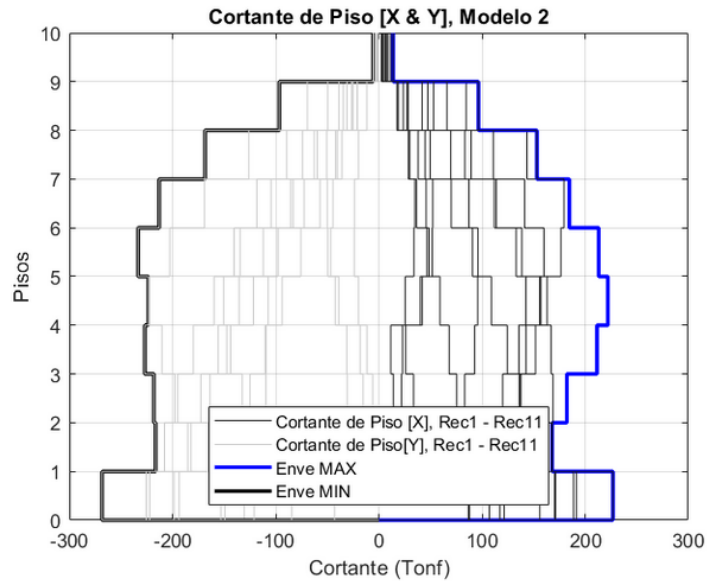


Fig. 58. Cortante, Análisis Tiempo Historia, Modelo 2

3.24.2 Desplazamiento inelástico de piso (11 registros / Análisis tiempo historia / Modelo 2)

A continuación, se muestran los desplazamientos de piso que son el resultado de los 11 registros cargados en el programa, adicionalmente se señala su envolvente.

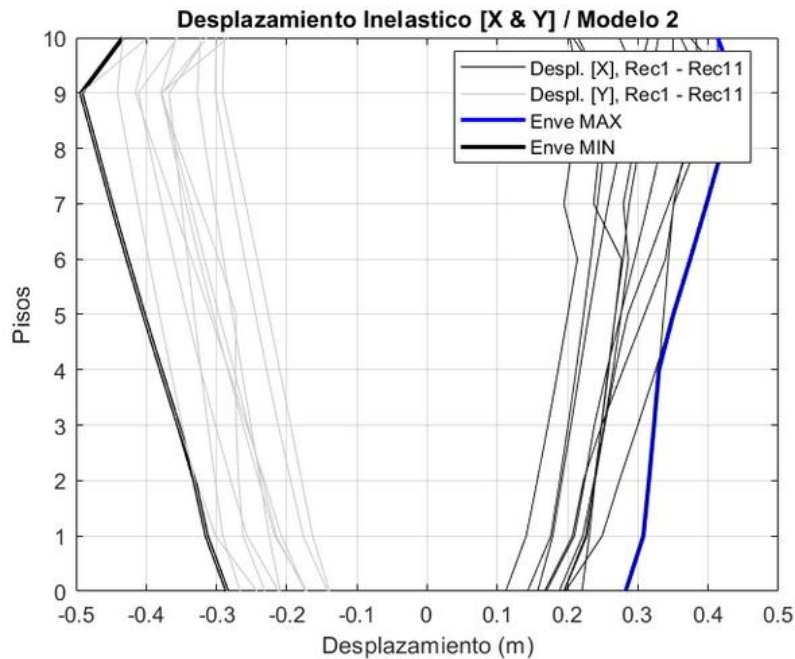


Fig. 59. Desplazamiento, Análisis Tiempo Historia, Modelo 2

3.25 Análisis Tiempo Historia: Base aislada Modelo 3

Tal como se realizó en el modelo 1 y 2, se calcularán las derivas, cortantes y desplazamientos de la estructura, se incorporaron los cambios indicados en la Tabla, y posteriormente se realizarán los cálculos de derivas, cortantes y desplazamientos.

Cabe recalcar que, debido a los cambios antes mencionados, el período de la estructura pasó de tener 2.95 segundos a 2.67 segundos.

A continuación, se procederá a calcular el período efectivo con los modificados del aislador:

$$W = 6.83 \text{ kips}$$

$$k_M = 0.0014 \text{ kips/in}$$

$$g = 386.22 \text{ in/s}^2$$

$$T_{eff} = 2\pi \sqrt{\frac{W}{k_M * g}} = 1.76 \text{ s}$$

$$T_{eff} = 1.76 \text{ s}$$

A continuación, se procede a calcular el 80% de T_{eff} .

$$0.8 * T_{eff} = 1.41 \text{ s}$$

De acuerdo a la ecuación:

$$\beta d = \left(\frac{0.15}{0.05} \right)^{0.3}$$

$$\beta d = 1.39$$

El valor de βd es igual a 1.39, por lo tanto, se divide el espectro modal considerado para este valor, en el segundo en el que la gráfica se encuentra en 1.41 segundos.

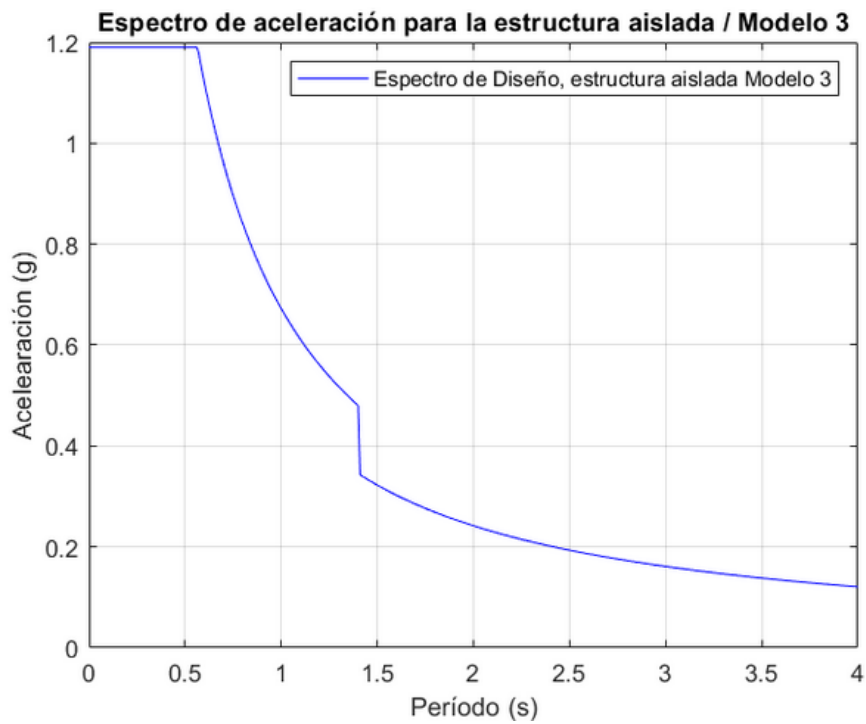


Fig. 60. Espectro de aceleración estructura aislada Modelo 3

3.25.1 Selección de registros

De la misma manera que en el modelo 1, se procede a introducir el espectro de respuesta en la página del PEER para obtener los registros que se ajustan a las características del modelo 3.

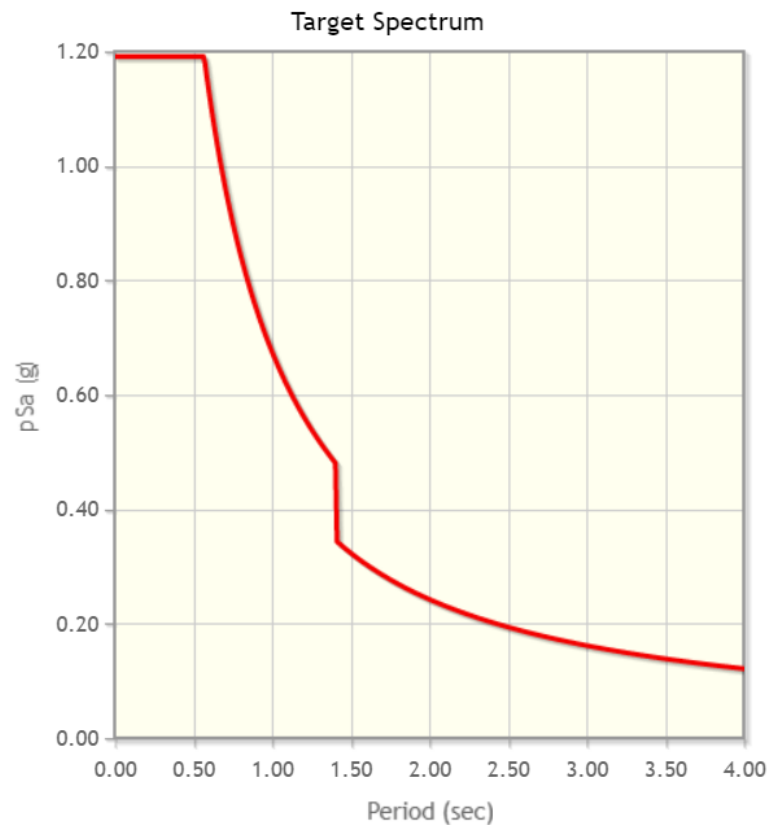


Fig. 61. Espectro a ingresar al PEER, Modelo 3

3.25.2 Registros Estructura Aislada Modelo 3

A continuación, se presentan los 11 registros escalados en sus tres direcciones, obtenidos de la página del PEER.

3.25.2.1 Registros en la componente Norte – Sur

A continuación, se presentan los 11 registros requeridos en la componente norte – sur.

Registros Sísmicos, Componente [N,S] / Modelo 3

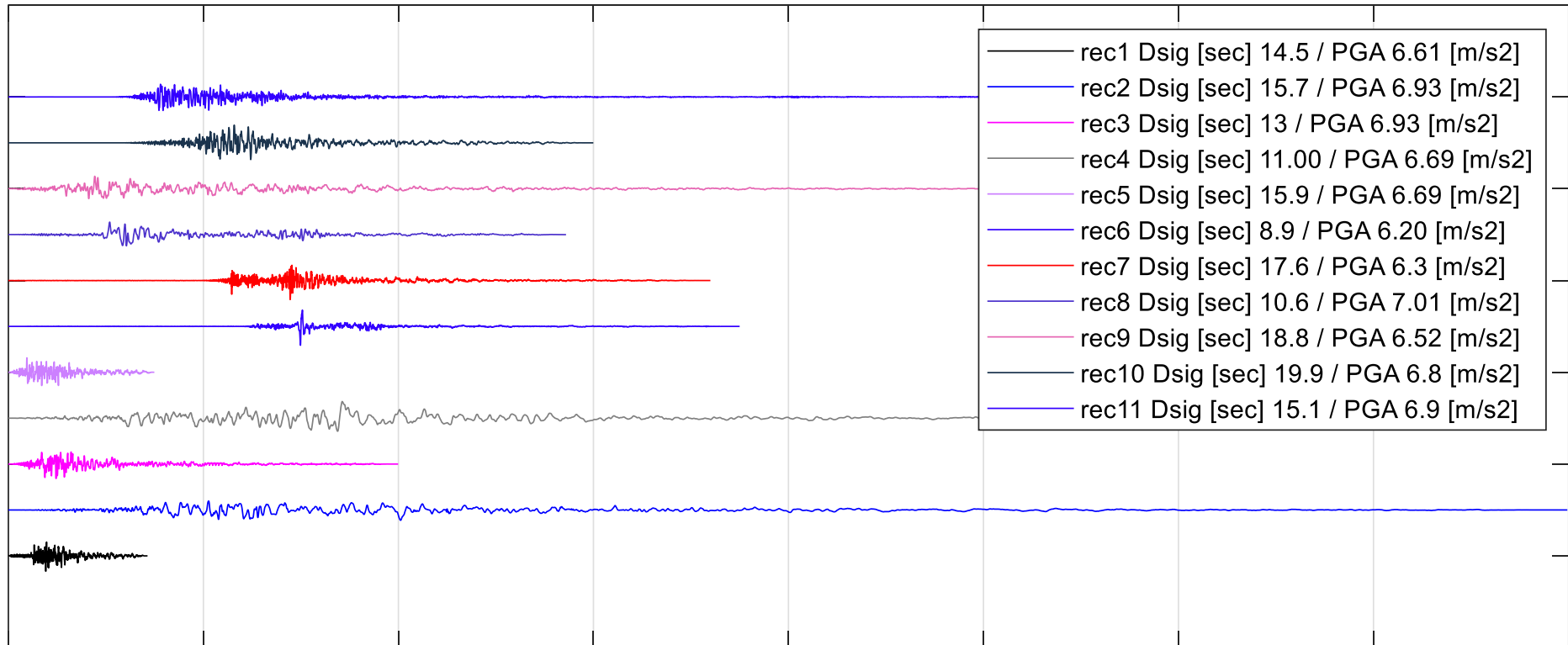


Fig. 62. Registros Sísmicos, Componente [N, S] / Modelo 3

3.25.2.2 Registros en la componente Este – Oeste

A continuación, se presentan los 11 registros requeridos en la componente este – oeste.

Registros Sísmicos, Componente [E,W] / Modelo 3

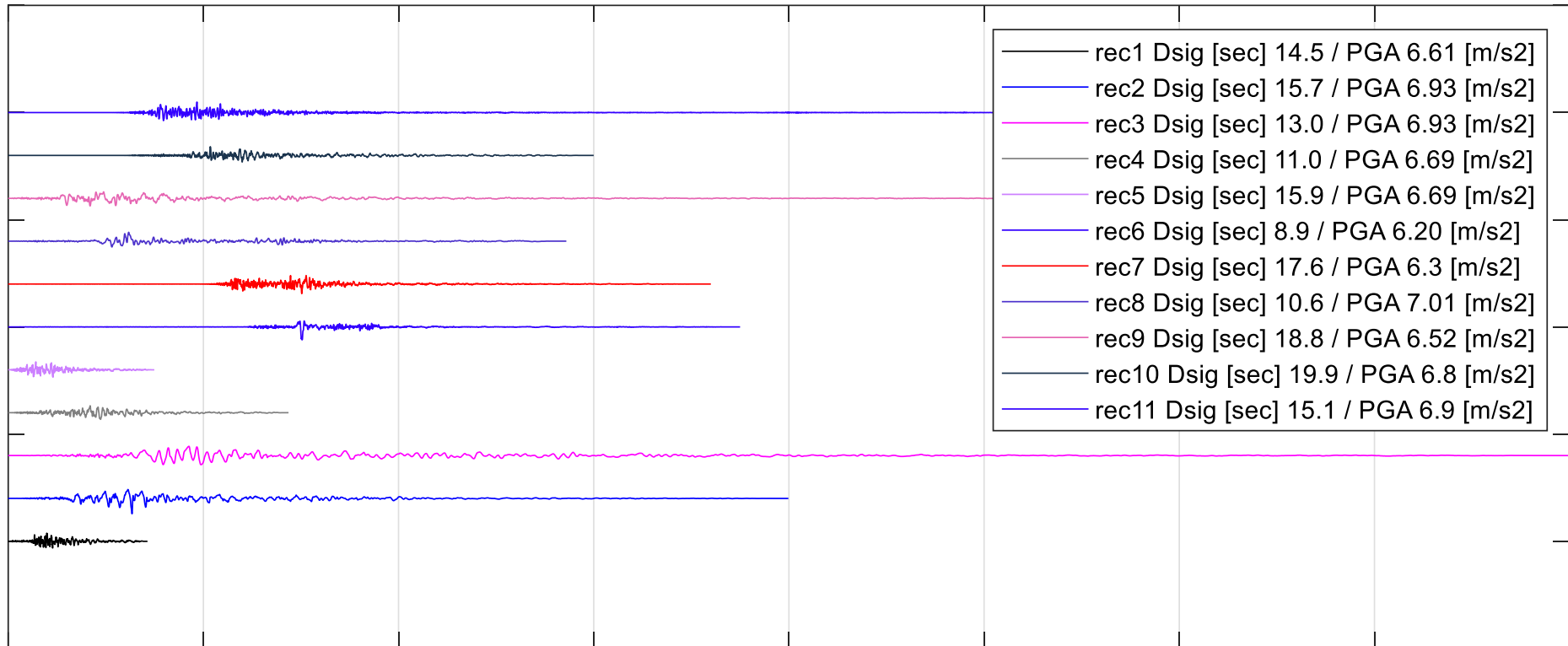


Fig. 63. Registros Sísmicos, Componente [E, W] / Modelo 3

3.25.2.3 Registros en la componente Vertical

A continuación, se presentan los 11 registros requeridos en la componente vertical.

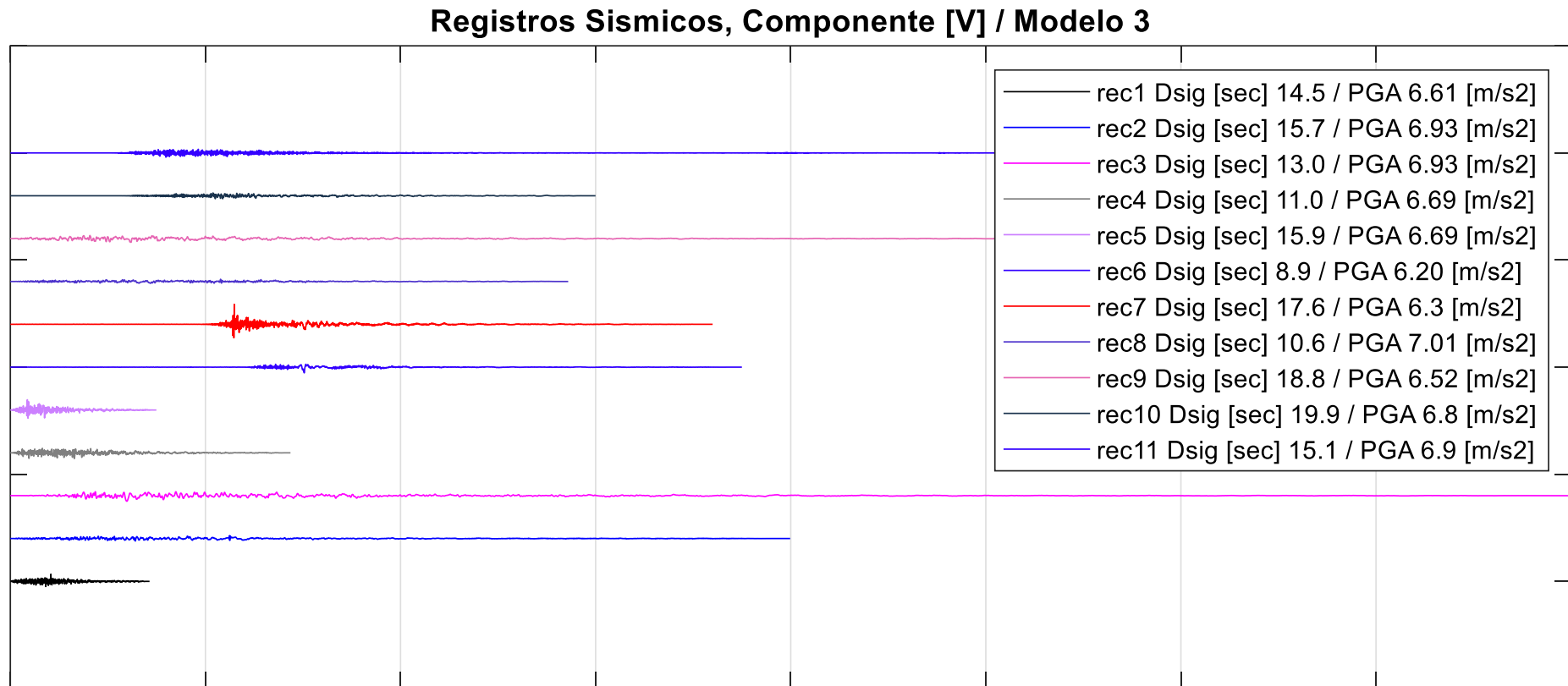


Fig. 64. Registros Sísmicos, Componente [V] / Modelo 3

3.26 Deriva inelástica de piso (11 registros / Análisis tiempo historia / Modelo 3)

A continuación, se muestran las derivas de piso que son el resultado de los 11 registros cargados en el programa, adicionalmente se señala su envolvente.

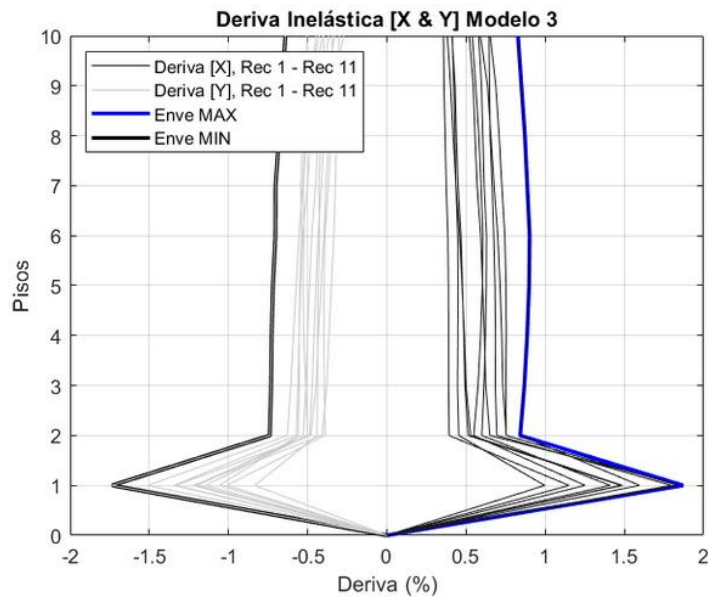


Fig. 65. Deriva, Análisis Tiempo Historia, Modelo

3.26.1 Cortante inelástico de piso (11 registros / Análisis tiempo historia / Modelo 3)

A continuación, se muestran los cortantes de piso que son el resultado de los 11 registros cargados en el programa, adicionalmente se señala su envolvente.

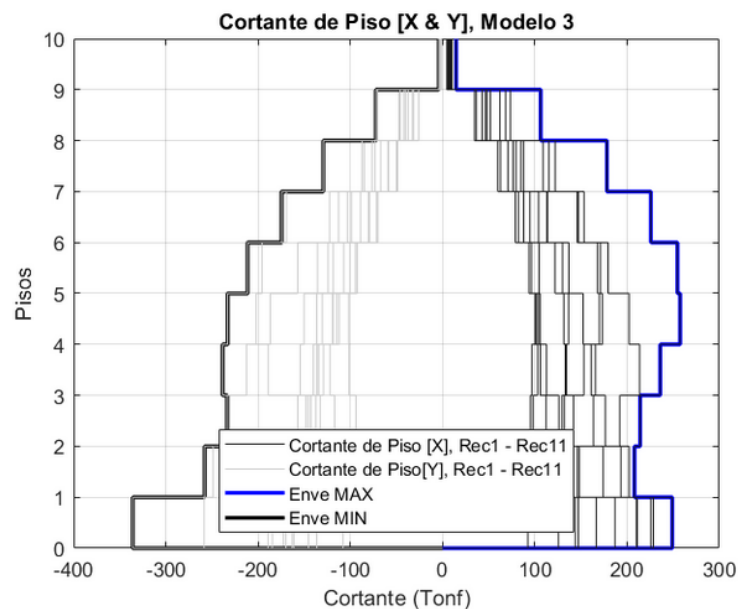


Fig. 66. Cortante, Análisis Tiempo Historia, Modelo 3

3.26.2 Desplazamiento inelástico de piso (11 registros / Análisis tiempo historia / Modelo 3)

A continuación, se muestran los desplazamientos de piso que son el resultado de los 11 registros cargados en el programa, adicionalmente se señala su envolvente.

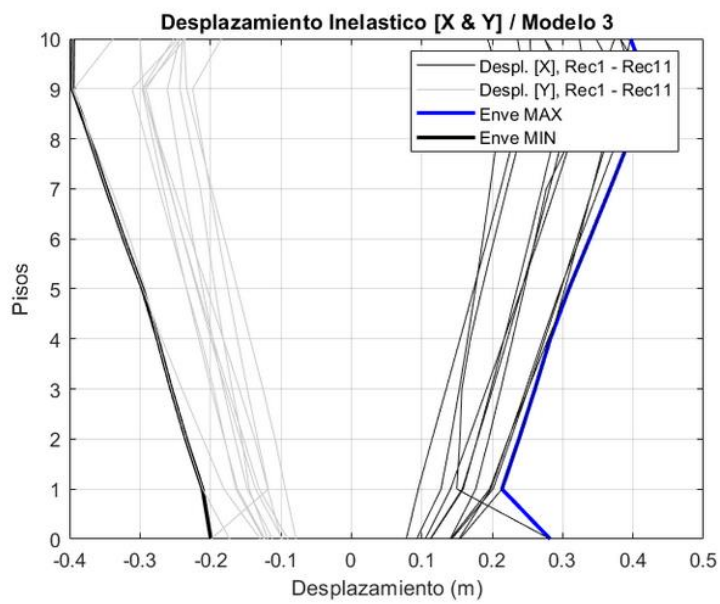


Fig. 67. Desplazamiento, Análisis Tiempo Historia, Modelo 3

CAPÍTULO 4: ANÁLISIS COMPARATIVO

4. Análisis comparativo

En esta sección se realizará el análisis comparativo de los resultados obtenidos de los diferentes modelos, se debe recordar que se ha realizado un modelo con base empotrada, y tres modelos con base aislada. A continuación, se presentarán los valores obtenidos anteriormente y cómo estos han ido cambiando de acuerdo al aislador proporcionado.

4.1 Análisis de Derivas inelásticas

A continuación, se muestra la gráfica de derivas que contiene las envolventes de cada modelo debido a los registros sísmicos cargados y estudiados anteriormente. En el gráfico se verifica como ha ido cambiando la curva de acuerdo a los aisladores proporcionados en los diferentes modelos.

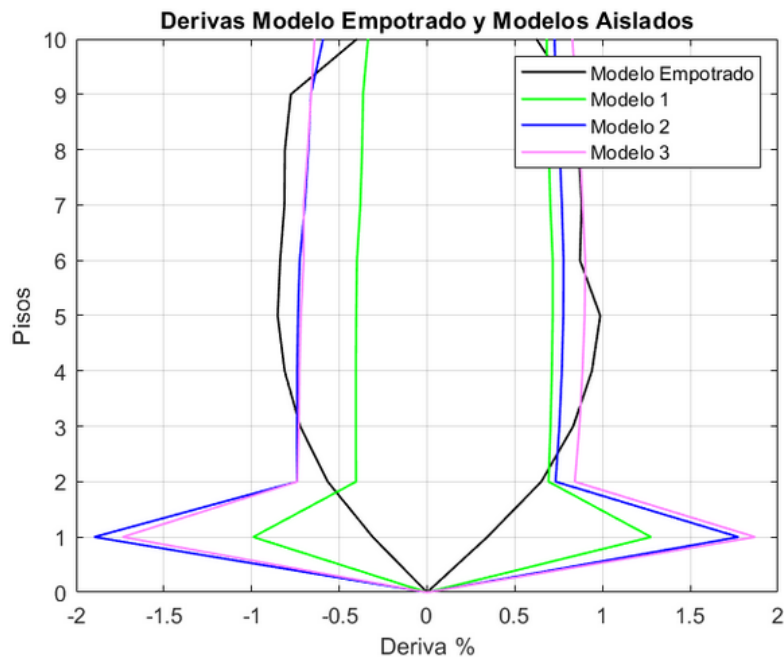


Fig. 68. Análisis Derivas, Modelo Empotrado y Modelos Aislados

4.2 Análisis de Fuerza Cortante Inelástica

A continuación, se muestran las distintas envolventes de los cortantes que contienen los registros en los diferentes modelos estudiados.

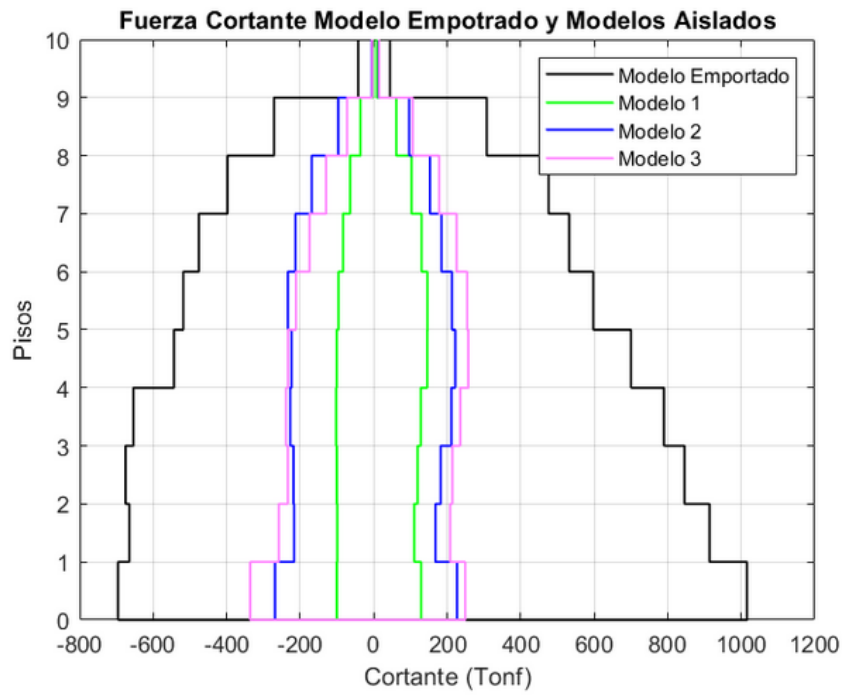


Fig. 69. Análisis Cortantes, Modelo Empotrado y Modelos Aislados

4.3 Análisis de Desplazamiento Inelástico

En el gráfico a continuación se presentan las envolventes de los desplazamientos en los modelos estudiados durante este análisis.

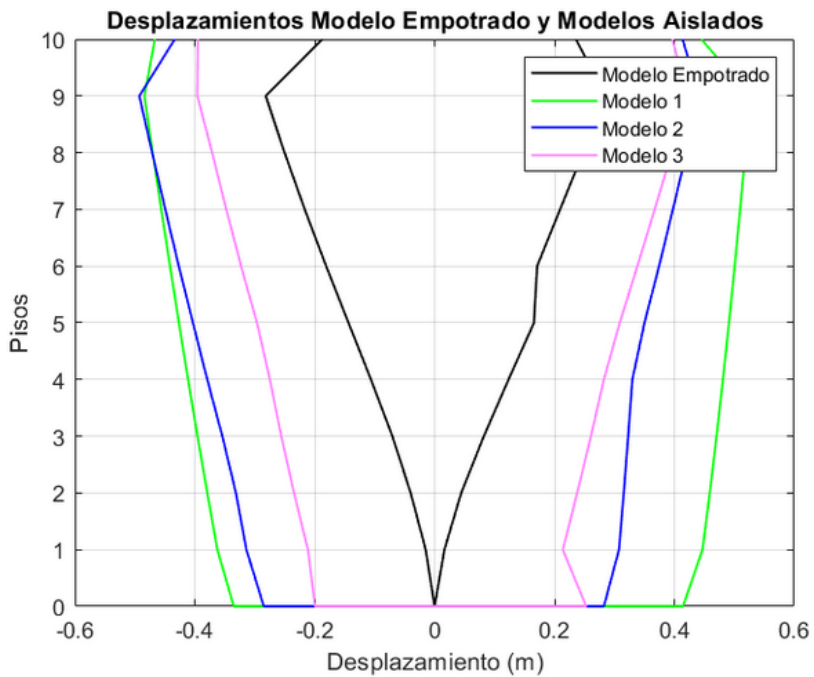


Fig. 70. Análisis Desplazamientos, Modelo Empotrado y Modelos Aislados

4.4 Análisis de Registros

Para una muestra de análisis y comparación de registros, se han seleccionado los segundos registros que se usaron para el análisis tiempo historia.

Muestra de Registros NS, Modelo Empotrado y Modelos Aislados

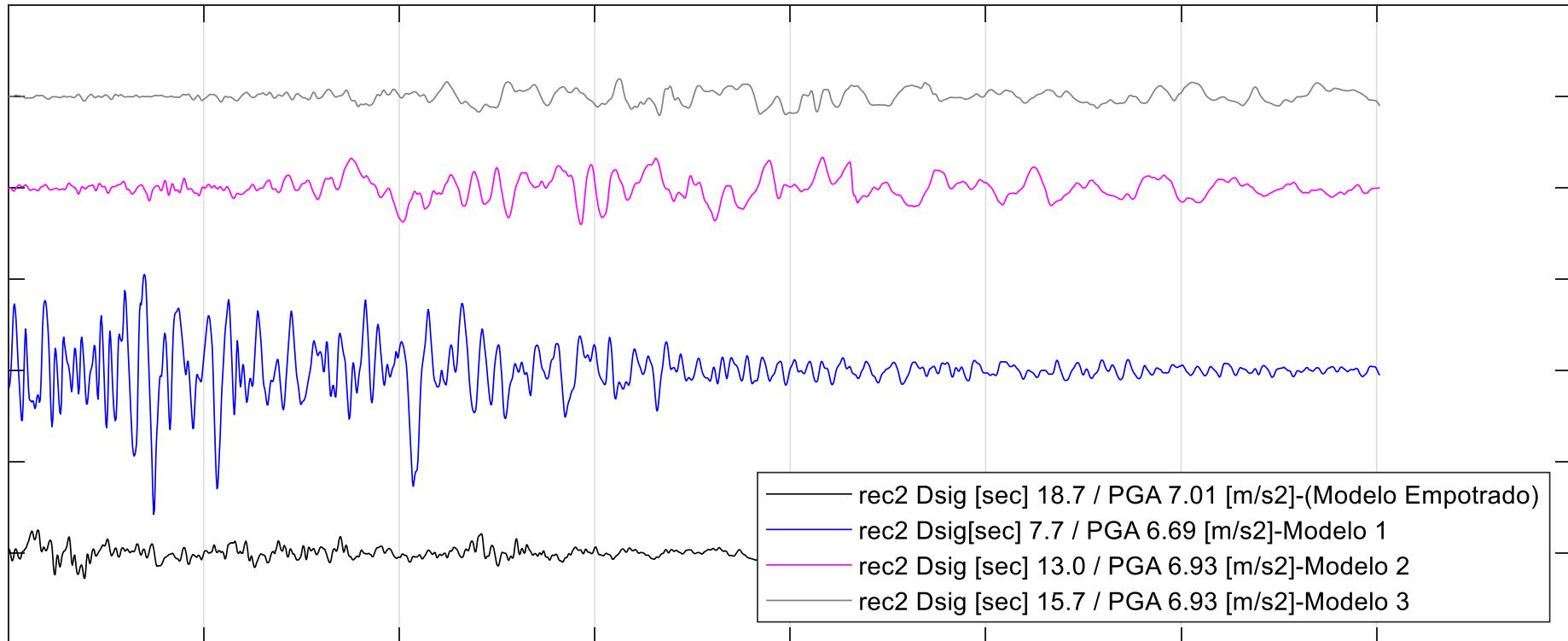


Fig. 71. Muestra Aleatoria de Registros (2) utilizados en el análisis

4.5 Variación Porcentual de Resultados

4.5.1 Variación Porcentual de Deriva Inelástica

A continuación, se presentan las variaciones porcentuales que se han producido en los diferentes modelos, y en todos los casos se ha comparado con el modelo empotrado ya que de esta manera se visualizará cómo cambian los resultados de acuerdo al aislador que se ha implementado.

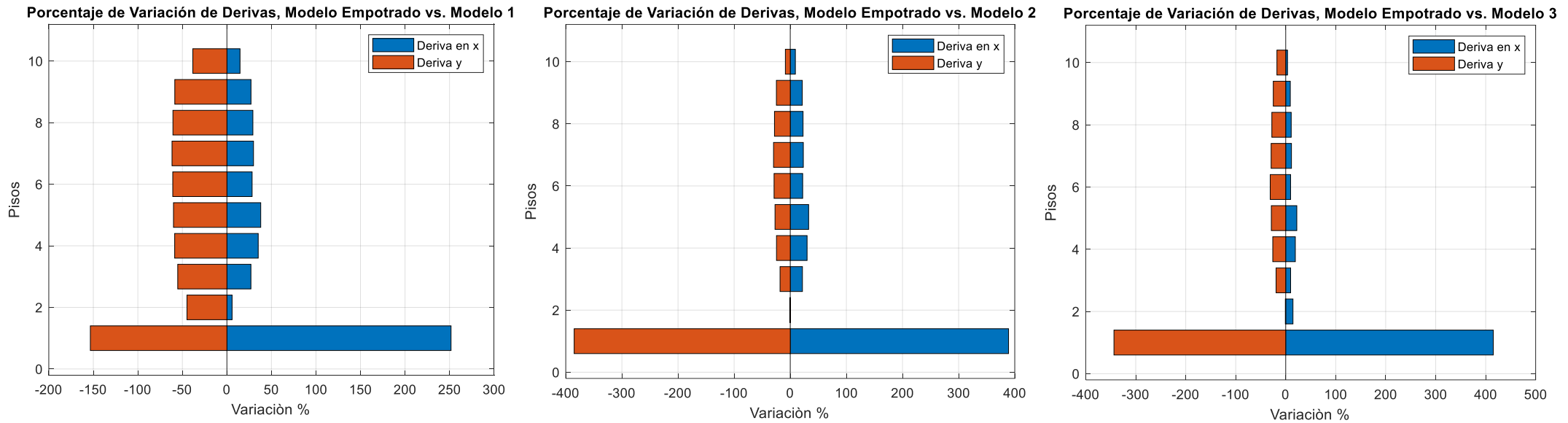


Fig. 72. Comparación de Variaciones Porcentuales de Deriva, Modelo Empotrado vs. Modelos Aislados

4.5.2 Variación Porcentual de Cortante Inelástico

A continuación, se presentan las variaciones que ha tenido la fuerza cortante en los modelos debido a los aisladores implementados, esto se lo compara con el modelo empotrado para que se puedan visualizar los cambios esperados.

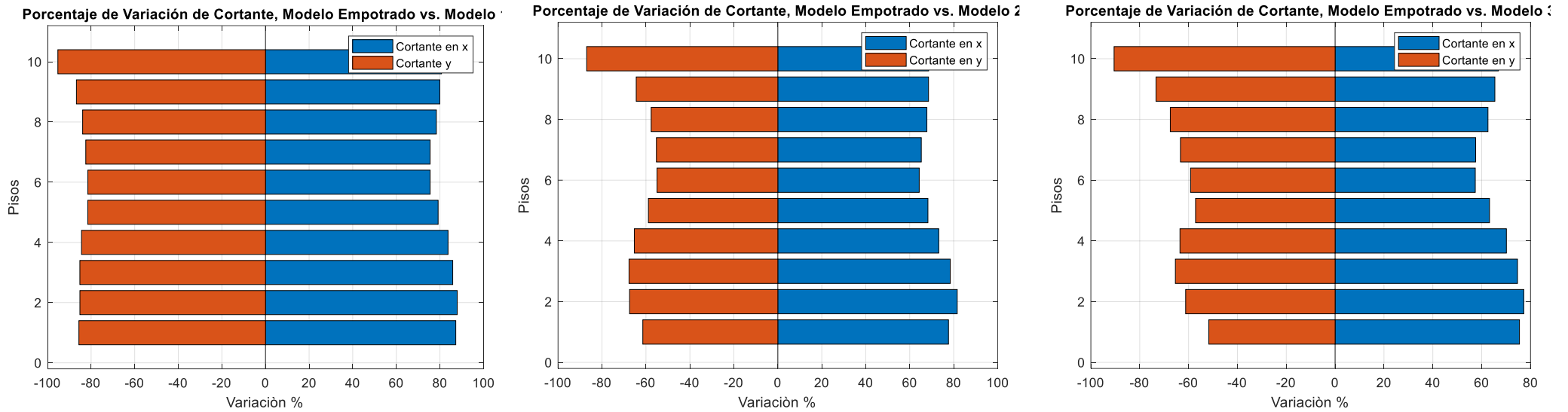
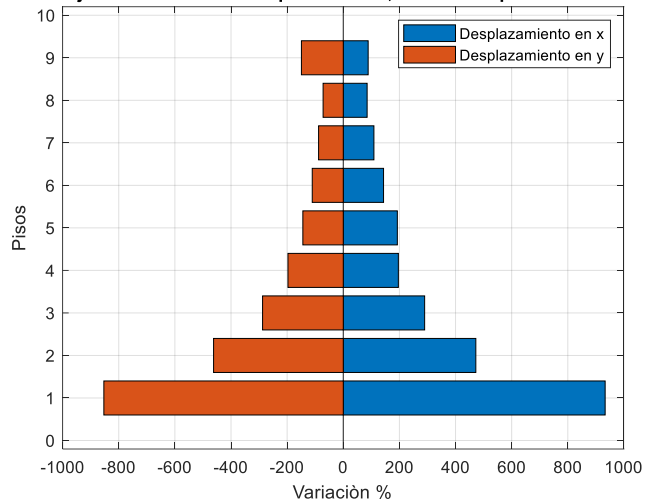


Fig. 73. Comparación de Variaciones Porcentuales de Cortante, Modelo Empotrado vs. Modelos Aislados

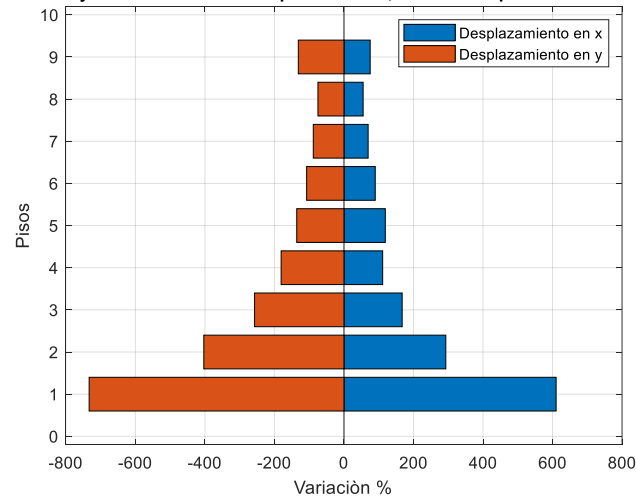
4.5.3 Variación Porcentual de Desplazamiento Inelástico

A continuación, se presentan las variaciones de desplazamiento porcentual de los modelos aislados en comparación con el modelo empotrado, en las gráficas se da a conocer cómo han ido cambiando los desplazamientos de los pisos en base a los aisladores colocados en los distintos modelos.

Porcentaje de Variación de Desplazamiento, Modelo Empotrado vs. Modelo 1



Porcentaje de Variación de Desplazamiento, Modelo Empotrado vs. Modelo 2



Porcentaje de Variación de Desplazamiento, Modelo Empotrado vs. Modelo 3

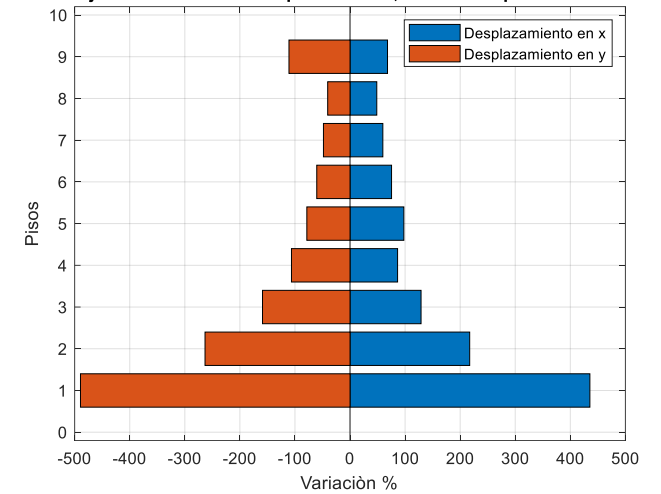


Fig. 74. Comparación de Variaciones Porcentuales de Desplazamiento, Modelo Empotrado vs. Modelos Aislados

Capítulo 5: CONCLUSIONES

1. Conclusiones

Una vez finalizado el análisis de los cuatro modelos, se puede evidenciar que han existido variaciones significativas en los resultados en cuanto al modelo de la estructura con base empotrada y a los tres modelos con base aislada.

Se debe reconocer que la estructura con los muros estructurales propuesta no es la adecuada para ser aislada, porque se deja de aprovechar todas las ventajas del sistema de aislamiento.

Es importante mencionar que, para seleccionar los registros sísmicos de los modelos, se basan en los períodos estructurales que estas tengan. En cuanto al Modelo 1, se tuvo un período de 3.6 segundos, el modelo 2 tuvo una reducción en su período estructural con un valor de 2.95 segundos, y el modelo 3 un período aún menor de 2.67, por lo que se puede concluir que el Modelo 1 que tiene el aislador con mejores cualidades, tendrá un mayor período estructural que un Modelo que contenga un aislador con cualidades menos significativas, como es el caso de los Modelos 2 y 3.

Cabe recalcar que las gráficas de desplazamientos de piso en los modelos aislados tienen valores de desplazamiento desde el nivel base, y esto es completamente cierto ya que, al tener el aislador en ese nivel, el momento del sismo, el aislador es el primer elemento que recibe la energía del sismo, caso contrario sucede con el modelo empotrado, que en la base no puede tener ningún tipo de desplazamiento debido a su condición de movimiento restringida.

Se evidencia que los gráficos de derivas y cortante han tenido un cambio significativo entre la base y el piso 1, esto se debe a que el piso 1 es el nivel inmediato superior a donde se encuentran los aisladores, por lo que los cambios drásticos en las gráficas confirman que los aisladores están cumpliendo su objetivo de brindar mayor resiliencia a la estructura.

Los modelos aislados uno dos y tres han tenido desplazamientos máximos de 663.89 mm, 696.30 mm y 756.54 mm correspondientemente. Por lo que se puede evidenciar que los aisladores no han llegado a su límite máximo de desplazamiento, adicionalmente, con estos valores, se puede observar que estas condiciones de desplazamiento se encuentran en la tercera etapa del diagrama de histéresis de los mismos, lo cual es muy conservador ya que eso quiere decir que los aisladores tienen aún más libertad en el caso esporádico de que se susciten sismos que requieran mayores exigencias del aislador.

1.1 Modelo 1

El Modelo 1 de base aislada tiene un aislador de diámetro 60.62" (1539.75 mm) siendo el de mayor tamaño. Al tener un mayor diámetro, tiene una mayor superficie de recorrido del aislador, es por esta razón que en la Fig. se muestra que el modelo 1 es el que tiene los desplazamientos más grandes con respecto a los otros aisladores, sin embargo, haciendo referencia a la tabla 7., se evidencia que el Aislador 1 tiene una mayor rigidez, al tener una mayor rigidez, también logra que las derivas de piso sean menores, cumpliendo con los límites establecidos por la NEC de derivas de piso máximas permisibles del 2%. En cuanto a la fuerza cortante, el aislador logra disipar el cortante de una manera considerable, a tal punto que, si se verifica en la Fig. el cortante se ha reducido en más del 80% tanto en la dirección x como en la dirección y.

1.2 Modelo 2

El Modelo 2 está constituido por un aislador de diámetro de 59.26" (1505.52 mm), es el segundo más grande de los 3 aisladores estudiados en este documento. Sucede prácticamente lo mismo que con el aislador del modelo 1, al tener un amplio recorrido debido a su diámetro, se verifica que la estructura tiene menor deriva y menor fuerza cortante. Sin embargo, en cuanto a los desplazamientos de piso, al igual que el modelo 1, van a seguir siendo mayores que el modelo de estructura empotrada, y tiene sentido debido a que, desde la base, el aislador ya genera desplazamientos producidos debido a los registros sísmicos a la que ha sido expuesta la estructura.

1.3 Modelo 3

El Modelo 3 es el que tiene la menor dimensión de diámetro en su aislador, es de decir 56.7" (1440 mm), como se ha dicho anteriormente, el recorrido del aislador tiene bastante influencia en los resultados que se han venido analizando, si se compara los aisladores de los modelos 2 y 3, los resultados de derivas, cortantes y desplazamientos son bastante cercanos, y esto es correcto ya que las variaciones en cuanto a dimensión, amortiguamiento y rigidez no fueron significativas, esto se verifica en los gráficos de la Fig. que incluso en las curvas de desplazamiento tienen pendientes similares.

1.4 Recomendaciones

Sería de gran utilidad que el Ecuador tenga un código normativo de aisladores. Debido a la gran amenaza que se tiene debido a la ubicación geográfica, es indispensable construir estructuras haciendo uso de aisladores sísmicos que hagan de las construcciones, estructuras resilientes capaces de cumplir la filosofía de resguardar la vida humana y también el propio patrimonio.

El momento de solicitar el producto al proveedor, en este caso el aislador, se debe tener en cuenta toda la información requerida de sitio en donde se asentará la estructura para que el aislador sea testeado y probado referenciando las condiciones necesarias para cumplir las solicitudes de los sismos de diseño y máximo considerado.

2. BIBLIOGRAFÍA

- Agudelo Zapata, J. A. (2014). Aisladores y disipadores sísmicos - Estructurando. *Estructurando*, 1. <https://estructurando.net/2014/10/14/aisladores-y-disipadores-sismicos/>
- Aguiar, R., Morales, E., Guaygua, B., & Rodríguez, M. (2014). Método simplificado para el análisis sísmico de estructuras con aisladores FPS de tercera generación. *Revista Internacional de Métodos Numéricos Para Cálculo y Diseño En Ingeniería*, 7.
- Aguiar, R., Morales, E., Guaygua, B., & Rodríguez, M. (2017). Método simplificado para el análisis sísmico de estructuras con aisladores FPS de tercera generación. *Revista Internacional de Metodos Numericos Para Calculo y Diseno En Ingenieria*, 33(1–2). <https://doi.org/10.1016/j.rimni.2016.03.002>
- Aguirre, H., & Gallegos, M. (2018). Estructuras Aporticadas de Hormigón Armado que Colapsaron en el Terremoto del 16 de Abril de 2016 en Tabuga– Ecuador. *Revista Politécnica*, 42(1), 37–46. <https://doi.org/10.33333/rp.v42i1.961>
- American Institute of Steel Construction. (2014). Code of Standard Practice Steel Building and Bridges.
- ASCE 7-16. (2017). ASCE 7 -16. Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures. In *Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures*. <https://doi.org/10.1061/9780784414248>
- Beauval, C., Marinière, J., Yepes, H., Audin, L., Nocquet, J. -M., Alvarado, A., Baize, S., Aguilar, J., Singaicho, J. -C., & Jomard, H. (2018). A New Seismic Hazard Model for Ecuador. *Bulletin of the Seismological Society of America*. <https://doi.org/10.1785/0120170259>
- Castro, P. W. (2017). *ANÁLISIS Y DISEÑO DE EDIFICIOS CON AISLADORES SÍSMICOS DE PÉNDULO FRICCIONAL DOBLE Y TRIPLE*. Lima.
- Celi, C., & Arellano, R. (2014). Fiabilidad del Modelamiento Sísmico, en el Rango No Lineal, en Función de la Longitud de las Zonas Plásticas Asumidas Para Vigas. *Revista Politécnica*, 33,

138–147.

https://revistapolitecnica.epn.edu.ec/ojs2/index.php/revista_politecnica2/article/viewFile/119/pdf

Celi, C., Pantoja, J., Sosa, D., & Ayala, C. (2017). *FINAL REPORT: CAPACITY CURVES AND FRAGILITY CURVES OF RESIDENTIAL BUILDINGS FOR THE CITY OF QUITO*. (Issue May). <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.28046.46402>

Celi, C., Pantoja, J., Sosa, D., & Ayala, C. (2018). SEISMIC VULNERABILITY OF QUITO ECUADOR, PHASE 1: CAPACITY CURVES OF STRUCTURAL TIPOLOGIES, PROJECT GEM -SARA. *Revista PUCE*, 0(106), 43–80.

Chicaiza Puchaicela, M. D. (2017). *Modelo de exposición y mapa de vulnerabilidad del Distrito Metropolitano de Quito*. Quito, 2017.

Earthquake Protection Systems. (2021). *FPT15656R/16-12R/12-7*. Ficha Técnica, Mare Island, Vallejo. Recuperado el 21 de Noviembre de 2021

Lazcano, S. (2012). Perfiles de velocidad de onda de corte y análisis del comportamiento sísmico del suelo en el poniente de Guadalajara, Jal. *Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica, A.C.*, 8.

Fenz & Constantinou . (2008). *Spherical sliding isolation bearings with adaptive behavior: Theory*. Earthquake engineering & structural dynamics.

Genatios, C., & Lafuente, M. (2016). Aisladores sísmicos ¿Una innovación en la ingeniería sismorresistente? In *Introducción al uso de aisladores y disipadores en estructuras*.

Hynd, Z., Toy, V., Marrero, J., Palacios, P., & Yepes, H. (2017). CONSTRUCTION OF A THREE-DIMENSIONAL GEOLOGICAL MODEL OF PORTOVIEJO TO SERVE AS A BASE FOR UNDERSTANDING BUILDING DAMAGE AND MICRO- SEISMIC HAZARD ASSESSMENT. *Memorias. VIII Jornadas En Ciencias de La Tierra, May*, 95–99.

Marrero, J. M., Yepes, H., Pastor, J., Palacios, P. B., Erazo, C., Ramón, P., & Estrella, C. (2019). Integrating and geolocating post earthquake building damage surveys: The 7.8 Mw Jama-Pedernales earthquake, Ecuador. *Spatial Information Research*, 27(3), 317–328. <https://doi.org/10.1007/s41324-018-0230-y>

NEC Committee. (2014). *Norma Ecuatoriana de la Construcción - NEC: NEC-SE-DS - Peligro*

Sísmico/Diseño Sísmo Resistente. Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda.
<https://doi.org/10.4067/S0717-69962013000200001>

PEER. (2020). *PEER Ground Motion Database - PEER Center*.

Rivadeneira, F., Segovia, M., Alvarado, A., Egred, J., Troncoso, L., Vaca, S., & Yepes, H. (2007).
Breves Fundamentos Terremotos Ecuador.pdf (p. 101).

Saenz, M. (2016). *Correlación cruzada de ruido sísmico para la obtención de perfiles profundos de velocidad de onda de corte en la cuenca de Santiago*. Santiago de Chile.

Sosa, D., Ayala, C., & Chicaiza, M. (2017). *Modelo de Exposición y Costo de Reposición del Área Urbana del Distrito Metropolitano de Quito (D.M.Q.)*.

Suntaxi, J. (Agosto de 2016). Análisis de un edificio con aisladores de base y su influencia en la curva de capacidad. *Análisis de un edificio con aisladores de base y su influencia en la curva de capacidad*. Quito, Pichincha, Ecuador.

Tenesaca, P., Aguacondo, E., Zambrano, W., & Cabrera, C. (2017). Análisis de velocidades de ondas de corte y periodos de vibración del suelo. Ciudad de Machala. *II Congreso Internacional de Ciencia y Tecnología*, 440–449.

UC BEKELEY. (s.f.). *Pacific Earthquake Engineering Research Center*. Obtenido de <https://peer.berkeley.edu/>

3. ANEXOS

3.1 Rutina Modelo Matemático para la obtención de la curva de Histéresis

```
clc;
clear;
filename = 'Datos.xlsx';
A = xlsread(filename);
X1=A(1:6,7);
Y=A(1:6,9);
Y11=A(1,9);
Y1w1=[A(2:6,9)-(A(2:6,1)*2)];
Y1=[Y11;Y1w1];
PX1=X1*-1;
PY1=Y1*-1;
PX2=X1;
PY2=Y1-A(1:6,1);
PX3=PX1;
PY3=PY2*-1;
PX4=PX2-(A(1:6,8)).*(A(1:6,11));
PY4=PY2-(A(1:6,2));
PX5=PX4*-1;
PY5=PY4*-1;
PX6=abs(X1-(A(1:6,4)));
PY6=PY4-(A(1:6,3));
PX7=PX6*-1;
PY7=PY6*-1;
DBEX=[0;
X1(1);PX2(1);PX4(1);PX6(1);PX1(1);PX3(1);PX5(1);PX7(1);X1(1)]
;
DBEY=[A(1,1);
Y(1);PY2(1);PY4(1);PY6(1);PY1(1);PY3(1);PY5(1);PY7(1);Y(1)];
MCEX=[X1(2);PX2(2);PX4(2);PX6(2);PX1(2);PX3(2);PX5(2);PX7(2);
X1(2)];
MCEY=[Y1w1(1);PY2(2);PY4(2);PY6(2);PY1(2);PY3(2);PY5(2);PY7(2);
Y1w1(1)];
Stg3X=[X1(3);PX2(3);PX4(3);PX6(3);PX1(3);PX3(3);PX5(3);PX7(3);
X1(3)];
Stg3Y=[Y1w1(2);PY2(3);PY4(3);PY6(3);PY1(3);PY3(3);PY5(3);PY7(3);
Y1w1(2)];
Stg4X=[X1(4);PX2(4);PX4(4);PX6(4);PX1(4);PX3(4);PX5(4);PX7(4);
X1(4)];
Stg4Y=[Y1w1(3);PY2(4);PY4(4);PY6(4);PY1(4);PY3(4);PY5(4);PY7(4);
Y1w1(3)];
Stg5aX=[PX2(4);X1(4);X1(5);PX2(5);PX2(4)];
Stg5aY=[PY2(4);Y1w1(3);Y1w1(4);PY2(5);PY2(4)];
Stg5bX=Stg5aX*-1;
Stg5bY=Stg5aY*-1;
Stg6aX=[X1(5);PX2(5);X1(6);PX2(6);X1(5)];
```

```

Stg6aY=[Y1w1(4);PY2(5);Y1w1(5);PY2(6);Y1w1(4)];
Stg6bX=Stg6aX*-1;
Stg6bY=Stg6aY*-1;
figure
plot(DBEX,DBEY,MCEX,MCEY,Stg3X,Stg3Y,Stg4X,Stg4Y,Stg5aX,Stg5a
Y,Stg5bX,Stg5bY,Stg6aX,Stg6aY,Stg6bX,Stg6bY)
function varargout = GuideHisteresis(varargin)
% GUIDEHISTERESIS MATLAB code for GuideHisteresis.fig
%     GUIDEHISTERESIS, by itself, creates a new
GUIDEHISTERESIS or raises the existing
%     singleton*.
%
%     H = GUIDEHISTERESIS returns the handle to a new
GUIDEHISTERESIS or the handle to
%     the existing singleton*.
%
%
GUIDEHISTERESIS('CALLBACK',hObject,eventData,handles,...)
calls the local
%     function named CALLBACK in GUIDEHISTERESIS.M with the
given input arguments.
%
%     GUIDEHISTERESIS('Property','Value',...) creates a new
GUIDEHISTERESIS or raises the
%     existing singleton*. Starting from the left, property
value pairs are
%     applied to the GUI before GuideHisteresis_OpeningFcn
gets called. An
%     unrecognized property name or invalid value makes
property application
%     stop. All inputs are passed to
GuideHisteresis_OpeningFcn via varargin.
%
%     *See GUI Options on GUIDE's Tools menu. Choose "GUI
allows only one
%     instance to run (singleton)".
%
% See also: GUIDE, GUIDATA, GUIHANDLES

% Edit the above text to modify the response to help
GuideHisteresis

% Last Modified by GUIDE v2.5 20-Jan-2022 21:28:04

% Begin initialization code - DO NOT EDIT
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',       mfilename, ...
                  'gui_Singleton',  gui_Singleton, ...

```

```

        'gui_OpeningFcn',
@GuideHisteresis_OpeningFcn, ...
        'gui_OutputFcn',
@GuideHisteresis_OutputFcn, ...
        'gui_LayoutFcn', [] , ...
        'gui_Callback', []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State,
varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
% End initialization code - DO NOT EDIT

% --- Executes just before GuideHisteresis is made visible.
function GuideHisteresis_OpeningFcn(hObject, eventdata,
handles, varargin)
% This function has no output args, see OutputFcn.
% hObject    handle to figure
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see
GUIDATA)
% varargin   command line arguments to GuideHisteresis (see
VARARGIN)

% Choose default command line output for GuideHisteresis
handles.output = hObject;

% Update handles structure
guidata(hObject, handles);

% UIWAIT makes GuideHisteresis wait for user response (see
UIRESUME)
% uiwait(handles.figure1);

% --- Outputs from this function are returned to the command
line.
function varargout = GuideHisteresis_OutputFcn(hObject,
eventdata, handles)
% varargout  cell array for returning output args (see
VARARGOUT);

```

```

% hObject      handle to figure
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see
GUIDATA)

% Get default command line output from handles structure
varargout{1} = handles.output;

% --- Executes on button press in datos.
function datos_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to datos (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see
GUIDATA)
global filename
global A
global X1
global Y
global Y11
global Y1w1
global Y1
global PX1
global PY1
global PX2
global PY2
global PX3
global PY3
global PX4
global PY4
global PX5
global PY5
global PX6
global PY6
global PX7
global PY7
global DBEX
global DBEY
global MCEX
global MCEY
global Stg3X
global Stg3Y
global Stg4X
global Stg4Y
global Stg5aX
global Stg5aY
global Stg5bX

```

```

global Stg5bY
global Stg6aX
global Stg6aY
global Stg6bX
global Stg6bY
[filename, pathname]=uigetfile('*.xlsx','Datos para curva
histeresis')
A = xlsread(filename);
X1=A(1:6,7);
Y=A(1:6,9);
Y11=A(1,9);
Y1w1=[A(2:6,9)-(A(2:6,1)*2)];
Y1=[Y11;Y1w1];
PX1=X1*-1;
PY1=Y1*-1;
PX2=X1;
PY2=Y1-A(1:6,1);
PX3=PX1;
PY3=PY2*-1;
PX4=PX2-(A(1:6,8)).*(A(1:6,11));
PY4=PY2-(A(1:6,2));
PX5=PX4*-1;
PY5=PY4*-1;
PX6=abs(X1-(A(1:6,4)));
PY6=PY4-(A(1:6,3));
PX7=PX6*-1;
PY7=PY6*-1;
DBEX=[0;
X1(1);PX2(1);PX4(1);PX6(1);PX1(1);PX3(1);PX5(1);PX7(1);X1(1)]
;
DBEY=[A(1,1);
Y(1);PY2(1);PY4(1);PY6(1);PY1(1);PY3(1);PY5(1);PY7(1);Y(1)];
MCEX=[X1(2);PX2(2);PX4(2);PX6(2);PX1(2);PX3(2);PX5(2);PX7(2);
X1(2)];
MCEY=[Y1w1(1);PY2(2);PY4(2);PY6(2);PY1(2);PY3(2);PY5(2);PY7(2)
);Y1w1(1)];
Stg3X=[X1(3);PX2(3);PX4(3);PX6(3);PX1(3);PX3(3);PX5(3);PX7(3)
;X1(3)];
Stg3Y=[Y1w1(2);PY2(3);PY4(3);PY6(3);PY1(3);PY3(3);PY5(3);PY7(3)
);Y1w1(2)];
Stg4X=[X1(4);PX2(4);PX4(4);PX6(4);PX1(4);PX3(4);PX5(4);PX7(4)
;X1(4)];
Stg4Y=[Y1w1(3);PY2(4);PY4(4);PY6(4);PY1(4);PY3(4);PY5(4);PY7(4)
);Y1w1(3)];
Stg5aX=[PX2(4);X1(4);X1(5);PX2(5);PX2(4)];
Stg5aY=[PY2(4);Y1w1(3);Y1w1(4);PY2(5);PY2(4)];
Stg5bX=Stg5aX*-1;
Stg5bY=Stg5aY*-1;

```

```

Stg6aX=[X1(5);PX2(5);X1(6);PX2(6);X1(5)];
Stg6aY=[Y1w1(4);PY2(5);Y1w1(5);PY2(6);Y1w1(4)];
Stg6bX=Stg6aX*-1;
Stg6bY=Stg6aY*-1;

% --- Executes on button press in R1.
function R1_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to R1 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see
GUIDATA)
R1=get(hObject, 'Value');
if R1==1
    global DBEX
    global DBEY
    global MCEX
    global MCEY
    global Stg3X
    global Stg3Y
    global Stg4X
    global Stg4Y
    global Stg5aX
    global Stg5aY
    global Stg5bX
    global Stg5bY
    global Stg6aX
    global Stg6aY
    global Stg6bX
    global Stg6bY

    plot(DBEX, DBEY, MCEX, MCEY, Stg3X, Stg3Y, Stg4X, Stg4Y, Stg5aX, Stg5a
Y, Stg5bX, Stg5bY, Stg6aX, Stg6aY, Stg6bX, Stg6bY);
        grid on
else
    plot(0,0)
end

% Hint: get(hObject,'Value') returns toggle state of R1

% --- Executes on button press in R2.
function R2_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to R2 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB

```

```

% handles      structure with handles and user data (see
GUIDATA)
R2=get(hObject,'Value');
if R2==1
global DBEX
global DBEY
plot(DBEX,DBEY);
grid on
else
    plot(0,0)
    grid on
end
% Hint: get(hObject,'Value') returns toggle state of R2

% --- Executes on button press in R3.
function R3_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to R3 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see
GUIDATA)
R3=get(hObject,'Value');
if R3==1
global MCEX
global MCEY
plot(MCEX,MCEY);
grid on
else
    plot(0,0)
    grid on
end
% Hint: get(hObject,'Value') returns toggle state of R3

% --- Executes on button press in R4.
function R4_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to R4 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see
GUIDATA)
R4=get(hObject,'Value');
if R4==1
global Stg3X
global Stg3Y
plot(Stg3X,Stg3Y);
grid on

```

```

else
    plot(0,0)
    grid on
end
% Hint: get(hObject,'Value') returns toggle state of R4

% --- Executes on button press in R5.
function R5_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to R5 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see
GUIDATA)
R5=get(hObject,'Value');
if R5==1
global Stg4X
global Stg4Y
plot(Stg4X,Stg4Y);
grid on
else
    plot(0,0)
    grid on
end
% Hint: get(hObject,'Value') returns toggle state of R5

% --- Executes on button press in R6.
function R6_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to R6 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see
GUIDATA)
R6=get(hObject,'Value');
if R6==1
global Stg5aX
global Stg5aY
global Stg5bX
global Stg5bY
plot(Stg5aX,Stg5aY,Stg5bX,Stg5bY);
grid on
else
    plot(0,0)
    grid on
end
% Hint: get(hObject,'Value') returns toggle state of R6

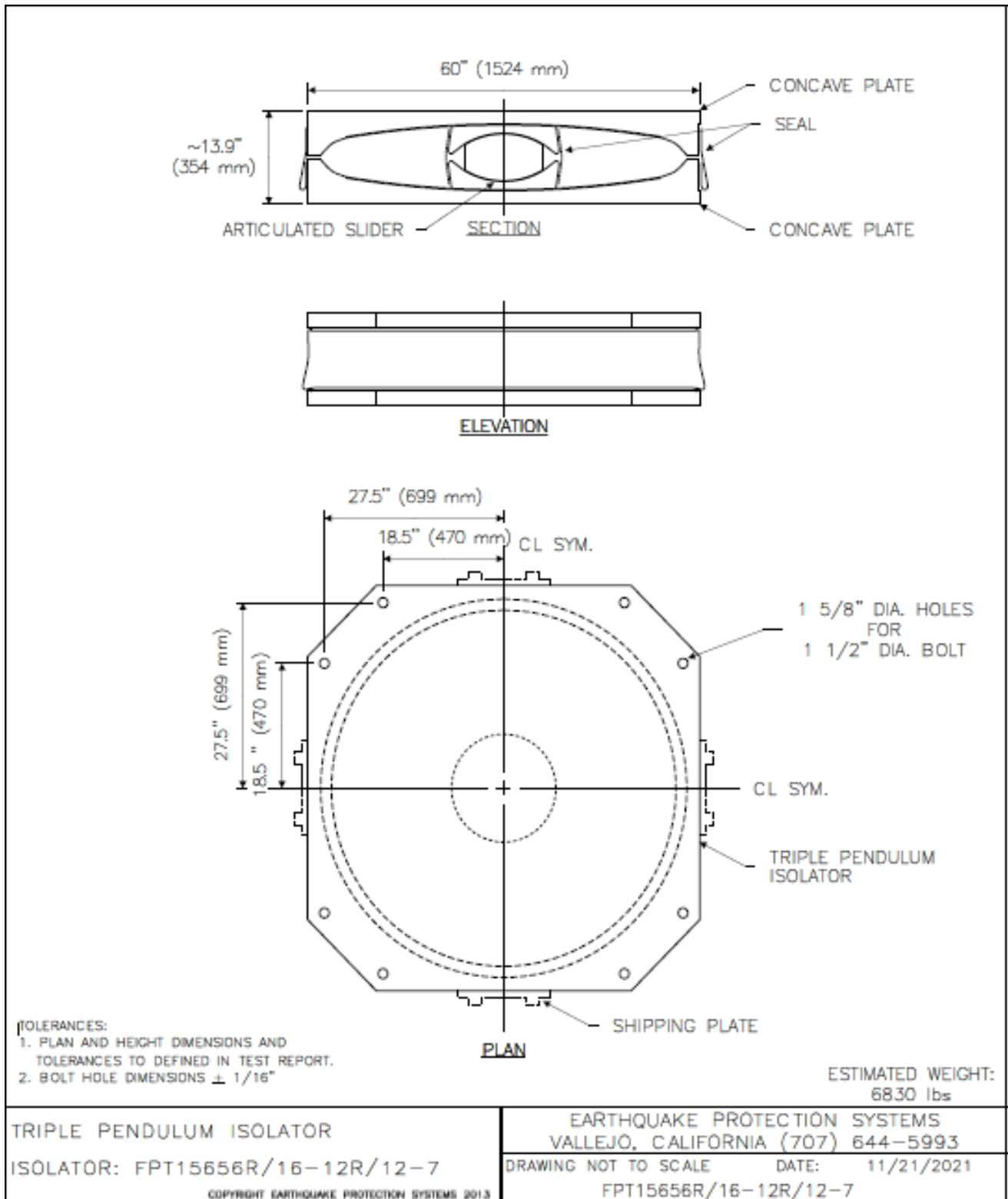
```

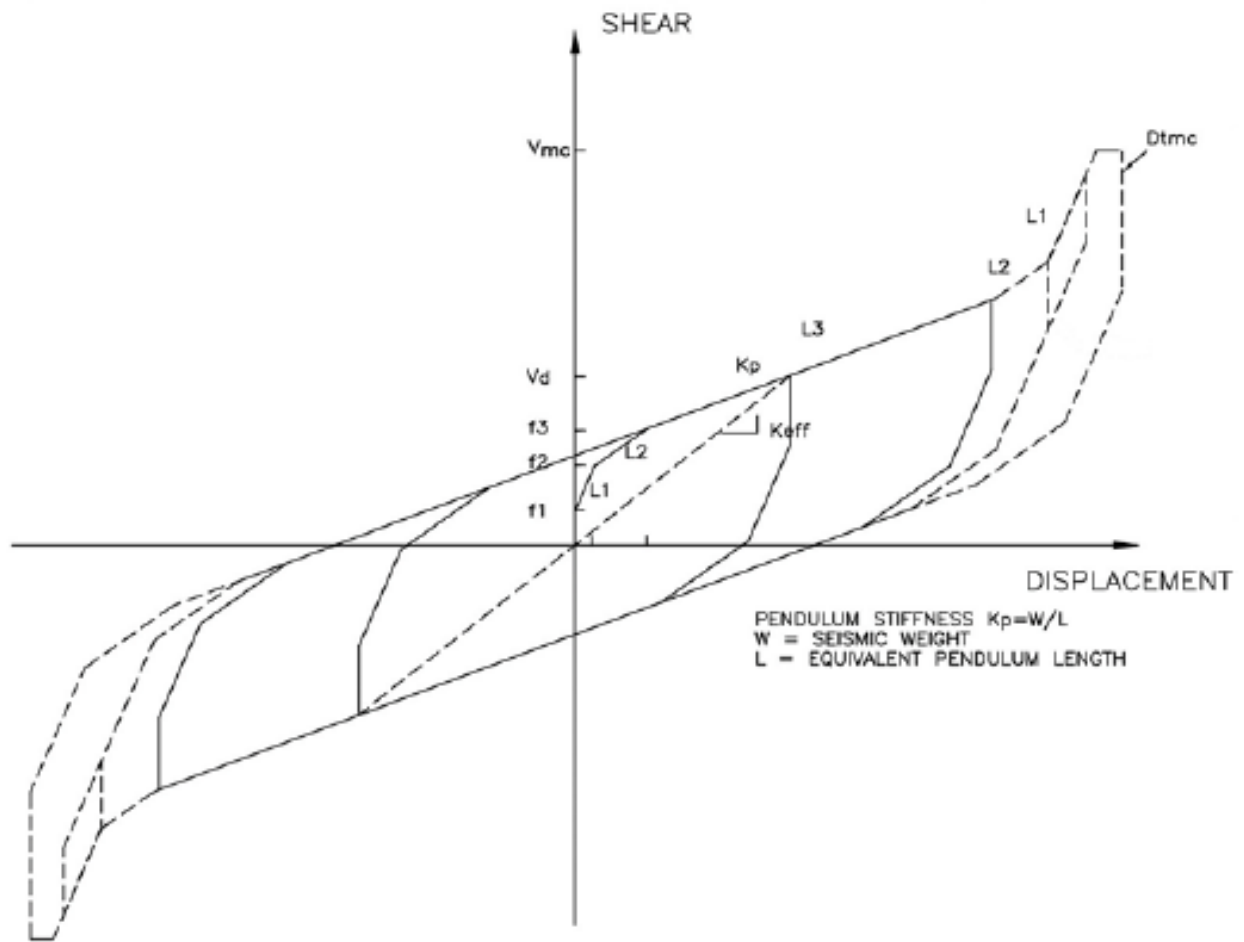
```

% --- Executes on button press in R7.
function R7_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to R7 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see
GUIDATA)
R7=get(hObject, 'Value');
if R7==1
global  Stg6aX
global  Stg6aY
global  Stg6bX
global  Stg6bY
plot(Stg6aX,Stg6aY,Stg6bX,Stg6bY);
grid on
else
    plot(0,0)
    grid on
end
% Hint: get(hObject,'Value') returns toggle state of R7

```

3.2 Ficha Técnica Aislador referencial de estudio (FPT15656R/16-12R/127)
 (Earthquake Protection Systems)





FORCE DISPLACEMENT LOOP

AT QUALITY CONTROL TEST VERTICAL LOAD

QC TEST TOLERANCES

QC LOAD: 1208kips (5373kN) min.

AVERAGE ISOLATOR PROPERTIES

	f1	f2	f3
LOWER	0.005	0.02	0.05
UPPER	0.01	0.03	0.06

INDIVIDUAL ISOLATOR PROPERTIES

	f1	f2	f3
LOWER	0.002	0.015	0.045
UPPER	0.01	0.03	0.06

PENDULUM LENGTHS

L1=17"(432mm)
L2=160"(4058mm)
L3=303"(7684mm)

PENDULUM PERIODS

T1=1.3sec
T2=4sec
T3=5.6sec

DISPLACEMENT CAPACITIES

Dcmc=44.9"(1142mm)
Dmc=29.9"(761mm)

SHEAR STRENGTH CAPACITY AT QCLOAD

Vmc=308 kips (1370kN)

FORCE DISPLACEMENT LOOP (NOT TO SCALE)

TRIPLE PENDULUM ISOLATOR

FPT15656R/16-12R/12-7

COPYRIGHT EARTHQUAKE PROTECTION SYSTEMS 2013

EARTHQUAKE PROTECTION SYSTEMS

VALLEJO, CALIFORNIA (707) 644-5993

DRAWING NOT TO SCALE DATE 11/21/2021

FPT15656R/16-12R/12-7A

FPT15656R/16-12R/12-7
Analytical Model Properties: Upper Bound

