

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PUCP

**ANÁLISIS Y MODELAMIENTO DE UN SISTEMA HÍBRIDO DE
DISIPACIÓN DE ENERGÍA: AISLADORES SÍSMICOS CON
AMORTIGUADORES EN BASE**

Tesis para optar el título profesional de Ingeniero Civil

AUTOR:

JAVIER ANTARES QUISPE VILCHES

ASESOR:

MAG. ING. CHRISTIAN ALBERTO ASMAT GARAYCOCHEA

Lima, Julio del 2021

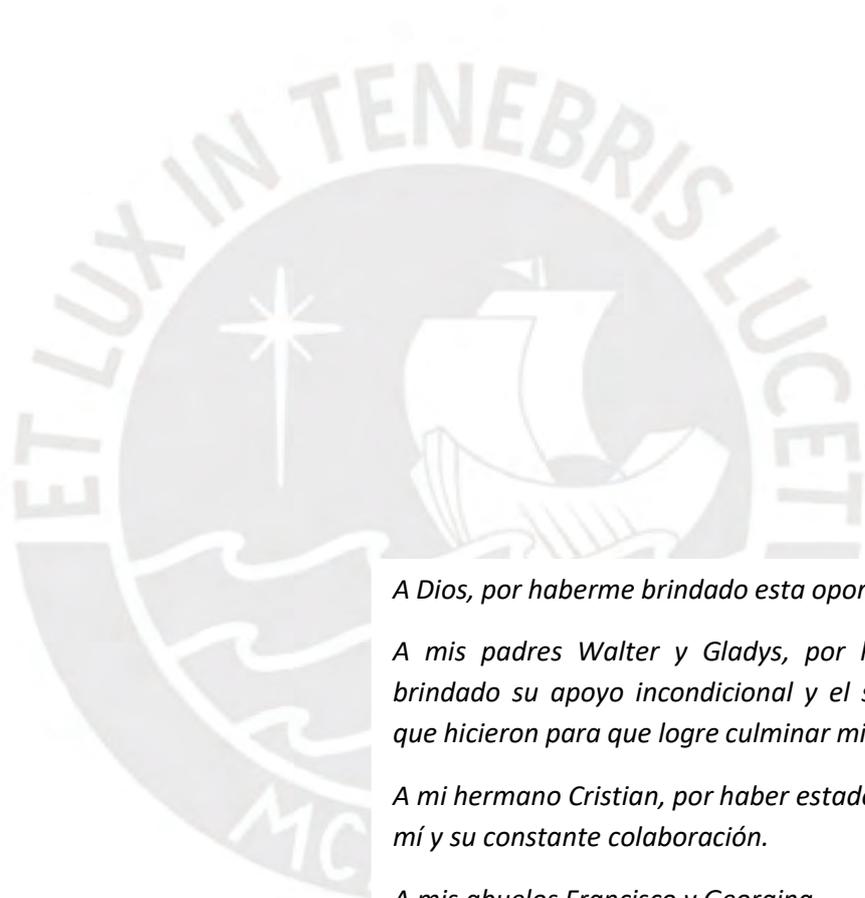
AGRADECIMIENTOS



Deseo expresar mis profundos agradecimientos al Mag. Ing. Christian Asmat Garaycochea por compartir sus conocimientos, por la valiosa aportación en la asesoría y corrección de la presente tesis. Gracias a ello se ha podido culminar este proyecto.

Quiero agradecer de manera muy especial a mis tíos Neyda y Roberto por su constante apoyo a largo de mi vida universitaria.

DEDICATORIA



A Dios, por haberme brindado esta oportunidad.

A mis padres Walter y Gladys, por haberme brindado su apoyo incondicional y el sacrificio que hicieron para que logre culminar mi carrera.

A mi hermano Cristian, por haber estado junto a mí y su constante colaboración.

A mis abuelos Francisco y Georgina.

En memoria de mis abuelos Oscar, Estelita y mi prima Glisset.

A todas y cada una de las personas presentes a lo largo de mi vida que han contribuido en mi formación personal y académica.

RESUMEN

El proceso de aislamiento de base en edificios como herramienta de prevención consiste en separar la superestructura y el suelo mediante una interfaz flexible, con el fin de disminuir el efecto del movimiento sísmico para la misma. Los proyectos con aislamiento sísmico se están incrementando en el país, son considerados entre los sistemas más efectivos de protección ante un sismo; sin embargo, tiene ciertas limitaciones ligadas a los dispositivos que lo conforman.

El sistema híbrido de disipación de energía es una variación del sistema aislado, presentando la adición de amortiguadores en la interfaz de aislamiento conformada por aisladores. El principal objetivo de este sistema es reducir el desplazamiento de esa interfaz. Esta reducción implica diferentes usos que se le puedan dar al sistema. No se analizará el aporte de algún sistema de control activo en el proyecto ni el diseño del sistema estructural.

En esta investigación el sistema aislado estará conformado por aisladores LRB y en el sistema híbrido se adicionará amortiguadores de fluido viscoso. El análisis comprende el modelamiento en el software ETABS 2018 de tres estructuras, cada una será analizada para distintos valores de amortiguaciones y se definirá la amortiguación adecuada para el sistema.

Los parámetros de la respuesta estructural para la comparación de sistemas son: los desplazamientos, derivas, fuerzas basales y el comportamiento de los aisladores. Los resultados detallarán los beneficios y posibles desventajas del sistema híbrido.

En el Perú no se ha plasmado un proyecto con la implementación del sistema híbrido y los estudios relacionados a este tema son escasos. Por ende, esta tesis ampliará el conocimiento de esta técnica desde un enfoque nacional.

TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

Título : Análisis y Modelamiento de un Sistema Híbrido de Disipación de Energía: Aisladores y Amortiguadores Sísmicos en la Base
Área : Estructuras – Investigación
Asesor : Mag. Ing. Christian Alberto Asmat Garaycochea
Alumno : JAVIER ANTARES QUISPE VILCHES
Código : 2013.0442.412
Tema N° : #455
Fecha : Lima, 17 de mayo de 2018



1. RESUMEN

La implementación de sistemas de protección sísmica se viene extendiendo por el país. Los sistemas de control pasivo son las que captan toda la presencia en el Perú, estos sistemas comprenden el uso de dispositivos como los aisladores y amortiguadores sísmicos.

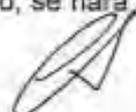
El aislamiento sísmico flexibiliza la estructura desacoplando el suelo con respecto a la edificación. Esto ocasiona que gran parte de la energía proveniente de un evento sísmico se disipe antes de llegar a la estructura, lo que se traduce en un gran desplazamiento en los aisladores. Debido a que solo una porción de la energía llega a la edificación, el desempeño de la misma mejora lo cual se traduce en la mejora de las derivas alrededor de 70 a 80% respecto al edificio convencional. Considerando el aislamiento base como el más efectivo en cuanto a mejor de desempeño de las edificaciones.

Sin embargo, el aislamiento de base también tiene limitaciones que van principalmente relacionados con los aisladores sísmicos. El principal problema es dado al levantamiento y capacidad de carga axial del aislador. Entre mayor desplazamiento tenga el aislador el problema de levantamiento se presentará y la capacidad de carga del aislador se verá reducido. Por ello, estos problemas son controlados con el aumento de diámetro del aislador.

El sistema híbrido de disipación de energía propone una optimización del aislamiento de base. Este sistema estará compuesto de aisladores sísmicos con amortiguadores de fluido viscoso ubicados en la base del edificio. La presencia de los amortiguadores permitirá reducir el desplazamiento en la base en un porcentaje de 40% y manteniendo el desempeño de la estructura. La reducción del desplazamiento permite el control de los problemas mencionados previamente, permitiéndole así también reducir la dimensión de aisladores.

Es necesario conocer el funcionamiento de este nuevo sistema y la variación directa con respecto al sistema aislado. Por ello, se hará el diseño de la estructura



67 i 

aislada y sobre la base de la misma se añadirá los dispositivos de amortiguación viscosa, los parámetros necesarios para la evaluación de resultados serán desplazamientos, derivas y fuerzas cortantes. Se escogerá el valor de amortiguación óptimo en el sistema y se comparará el desempeño con la estructura aislada y convencional previamente definidas.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo General

Aportar al conocimiento sobre el beneficio del uso de sistemas híbridos de protección sísmica en la base de edificaciones.

2.2. Objetivos específicos

- Estudiar el funcionamiento de un sistema híbrido de disipación de energía que comprende aisladores sísmicos con amortiguadores en la base de un edificio.
- Proponer pautas del diseño del sistema ya mencionado.
- Analizar y comparar del desempeño de una edificación ante un sismo que tiene implementado el sistema híbrido de disipación de energía y un aislamiento base.

3. JUSTIFICACIÓN Y ALCANCE

El aislamiento sísmico soluciona diversos problemas referidos al desempeño de la estructura. Sin embargo, la principal limitación de este sistema está relacionado con los dispositivos ubicados en la base del edificio. El sistema híbrido propone una optimización del aislamiento sísmico, controlando las limitaciones de los aisladores sísmicos y manteniendo un desempeño adecuado del edificio.

Se realizará pautas para el diseño de los "dispositivos" de aislamiento sísmico y disipación de energía. Se explayará las relaciones que existen en las mismas y como varía su funcionamiento respecto al sistema de aislamiento sísmico. No se tocará el diseño de los elementos estructurales.

Respecto al análisis de resultados al final de este proyecto de tesis se pretende conocer los beneficios de la implementación de un sistema híbrido de disipación de energía en contraste con el sistema de aislamiento de base. Esto se realizará mediante el modelamiento de las estructuras que contengan el sistema híbrido y aislamiento de base. Los parámetros a comparar entre ambas estructuras caracterizan el desempeño de las mismas, los cuales corresponden a las derivas de entrepiso y fuerza cortante del edificio.



62 ii 

TABLA DE CONTENIDO

CAPÍTULO I: GENERALIDADES	1
1.1 Introducción	1
1.2 Metodología de trabajo	2
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	4
2.1 Aisladores sísmicos.....	4
2.1.1 Aisladores elastoméricos.....	4
2.1.2 Aisladores deslizantes	8
2.2 Amortiguadores sísmicos	9
2.2.1 Amortiguadores metálicos	10
2.2.2 Amortiguadores friccionales	11
2.2.3 Amortiguadores de fluido viscoso (FVDs)	12
2.3 Sistemas de control de respuesta	15
2.3.1 Sistema de control pasivo	15
2.3.2 Sistema de control activo	16
2.3.3 Sistemas de control semi activo	17
2.4 Sistema híbrido de disipación de energía	18
2.4.1 Sistema híbrido de disipación de energía: LRB y FVDs.....	18
CAPÍTULO III: PARÁMETROS DE SELECCIÓN.....	24
3.1 Requisitos generales de diseño.....	24
3.1.1 Referido al sistema de aislamiento – ASCE 7-16.....	24
3.1.2 Referido al sistema de disipación.....	25
3.1.3 Referido al sistema estructural	25
3.1.4 Combinaciones de cargas verticales en aisladores – Norma E.031	26
3.1.5 Factores de modificación de propiedades de los aisladores – Norma E 0.31.....	27
3.2 Análisis para el sistema aislado.....	28
3.2.1 Análisis estático o de fuerzas laterales equivalentes.....	28
3.2.2 Análisis dinámico modal espectral	29
3.2.3 Análisis no lineal Tiempo - Historia	29
3.3 Análisis para el sistema híbrido.....	30
3.3.1 Espectro definido	30
3.4.2 Registros de señales a utilizar	31
CAPÍTULO IV: CRITERIOS DE DISEÑO PARA EL SISTEMA HÍBRIDO.....	34
4.1 Parámetros de diseño de sistema aislado con aisladores LRB.....	34
4.1.1 Procedimiento estático o de fuerzas equivalentes	35
4.2 Diseño de los amortiguadores de fluido viscoso (FVDs)	37

4.2.1	Parámetros de diseño.....	38
4.2.2	Amortiguadores de fluido viscoso en la base del edificio	43
CAPÍTULO V: ANÁLISIS DE ELEMENTOS.....		49
5.1	Criterios de modelamiento	49
5.2	Estructura convencional de base fija	50
5.3	Estructura con aislamiento sísmico.....	52
5.3.1	Estructuras y distribuciones de aisladores	52
5.3.2	Diseño nominal de los aisladores.....	54
5.3.3	Modificación de las propiedades de los aisladores.....	56
5.3.4	Resultados modales	58
5.3.5	Verificación de derivas, aceleraciones y desplazamientos	58
5.3.6	Verificación Ciclo histéresis y Fuerza Restitutiva del sistema	60
5.3.7	Verificación carga axial en los aisladores	63
5.4	Estructura con el sistema híbrido de disipación de energía	64
5.4.1	Estructuras y distribuciones de los amortiguadores	65
5.4.2	Cálculo del coeficiente de amortiguamiento “C”	66
5.4.3	Resultados modales	71
CAPÍTULO VI: ANÁLISIS DE RESULTADOS		72
6.1	Concentración de vibración en un solo modo	72
6.2	Análisis de derivas	73
6.2.1	Resultados en el sistema aislado.....	73
6.2.2	Resultados en el sistema híbrido	75
6.2.3	Comparación de valores promedios	78
6.3	Análisis desplazamiento de base.....	84
6.3.1	Resultados en el sistema aislado.....	84
6.3.2	Resultados en el sistema híbrido	86
6.3.3	Comparación de valores.....	90
6.4	Influencia de la variabilidad del coeficiente de velocidad	93
6.5	Comportamiento variables respecto al amortiguamiento.....	94
6.6	Influencia del sistema híbrido en la fuerza restitutiva	96
6.7	Variación de la disipación de energía en los aisladores	100
CAPÍTULO VII: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		103
7.1	Conclusiones.....	103
7.2	Recomendaciones	106
Bibliografía.....		107

LISTA DE TABLAS

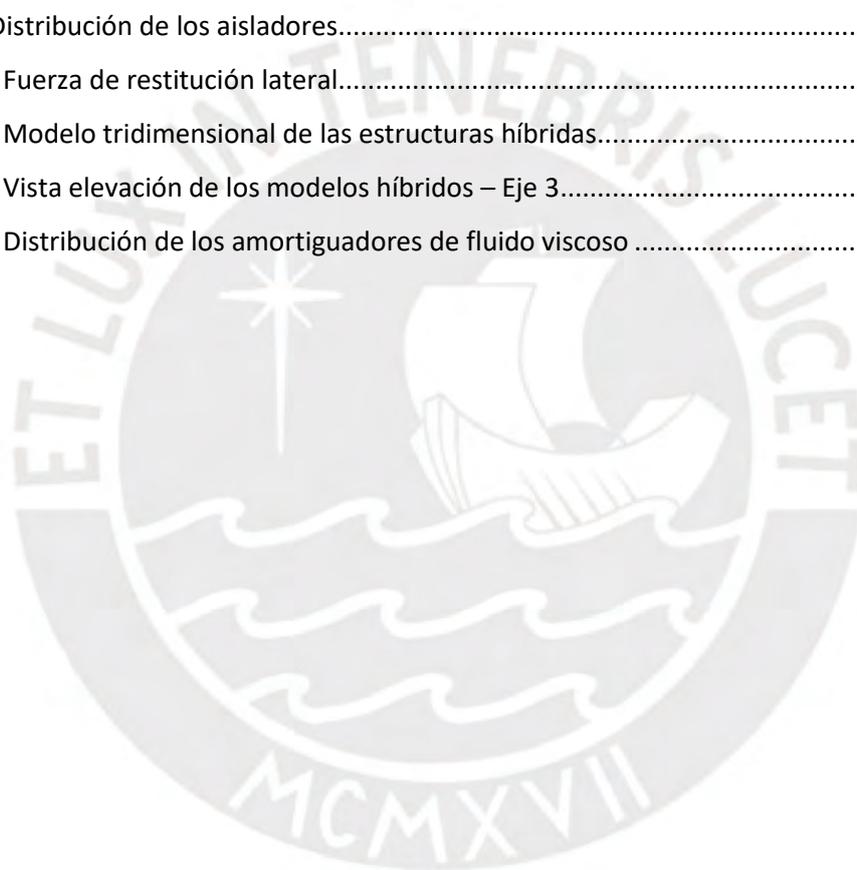
Tabla 2.1 Efectos en desplazamientos y derivas al adicionar los amortiguadores	23
Tabla 3.1 Restricción de irregularidades en la estructura.....	26
Tabla 3.2 Factores de modificación máximos y mínimos de propiedades - Dispositivos Clase I	27
Tabla 3.3 Factores de modificación máximos y mínimos de propiedades - Dispositivos Clase II	27
Tabla 3.4 Factor de Zona	30
Tabla 3.5 Factor Suelo “S”	30
Tabla 3.6 Periodos “Tp” y “TL”	30
Tabla 3.7 Valores para la construcción del Espectro.....	31
Tabla 3.8 Descripción de las señales escogidas	31
Tabla 4.1 Relación amortiguamiento efectivo con factor BM	35
Tabla 4.2 Rendimiento esperado para terremotos menores, moderados y mayores.....	45
Tabla 4.3 Derivas ligadas al nivel de daño referido a cada tipo de estructura – Código alta exigencia.....	46
Tabla 4.4 Derivas ligadas al nivel de daño referido a cada tipo de estructura – Código exigencia moderada	46
Tabla 4.5 Aceleraciones máximas de piso utilizadas para definir valores medianos de daño a componentes sensibles a la aceleración no estructural	47
Tabla 5.1 Relación $Peso\ sísmico / Área$ para todas las estructuras	51
Tabla 5.2 Distancia relativa entre el Centro de Rigidez y el Centro de Masas Acumulado	51
Tabla 5.3 Periodo y masa participante para cada estructura – Base Fija	52
Tabla 5.4 Parámetros nominales para el análisis estático	54
Tabla 5.5 Propiedades no lineales de aisladores nominales.....	56
Tabla 5.6 Factores de modificación máximos y mínimos.....	56
Tabla 5.7 Propiedades no lineales del sistema de aislamiento para cada estructura	58
Tabla 5.8 Periodo y masa participante acumulada de todos los Sistemas Aislado - Nominal....	58
Tabla 5.9 Derivas y aceleraciones máximas – Límite superior X.....	60
Tabla 5.10 Derivas y aceleraciones máximas – Límite superior Y	60
Tabla 5.11 Desplazamientos máximos en la azotea y base – Límite inferior X.....	60
Tabla 5.12 Desplazamientos máximos en la azotea y base – Límite inferior Y	60
Tabla 5.13 Cargas mínimas – Aisladores con mayores tracciones y compresiones X-X	64
Tabla 5.14 Cargas mínimas – Aisladores con mayores tracciones y compresiones Y-Y.....	64
Tabla 5.15 Propiedades del perfil metálico.....	66
Tabla 6.1 Derivas inelásticas Sistema Aislado X-X – Límite superior – E1.....	74

Tabla 6.2 Derivas inelásticas Sistema Aislado Y-Y – Límite superior – E1	74
Tabla 6.3 Derivas inelásticas Sistema Aislado X-X – Límite superior – E2	74
Tabla 6.4 Derivas inelásticas Sistema Aislado Y-Y – Límite superior – E2	74
Tabla 6.5 Derivas inelásticas Sistema Aislado X-X – Límite superior – E3	75
Tabla 6.6 Derivas inelásticas Sistema Aislado X-X – Límite superior – E3	75
Tabla 6.7 Derivas inelásticas Sistema Híbrido X-X $\alpha=0.15$ – Límite superior – E1	75
Tabla 6.8 Derivas inelásticas Sistema Híbrido Y-Y $\alpha=0.15$ – Límite superior – E1	76
Tabla 6.9 Derivas inelásticas Sistema Híbrido X-X $\alpha=0.5$ – Límite superior – E1	76
Tabla 6.10 Derivas inelásticas Sistema Híbrido Y-Y $\alpha=0.5$ – Límite superior – E1	76
Tabla 6.11 Derivas inelásticas Sistema Híbrido X-X $\alpha=0.15$ – Límite superior – E2	76
Tabla 6.12 Derivas inelásticas Sistema Híbrido Y-Y $\alpha=0.15$ – Límite superior – E2	77
Tabla 6.13 Derivas inelásticas Sistema Híbrido X-X $\alpha=0.5$ – Límite superior – E2	77
Tabla 6.14 Derivas inelásticas Sistema Híbrido Y-Y $\alpha=0.5$ – Límite superior – E2	77
Tabla 6.15 Derivas inelásticas Sistema Híbrido X-X $\alpha=0.15$ – Límite superior – E3	77
Tabla 6.16 Derivas inelásticas Sistema Híbrido Y-Y $\alpha=0.15$ – Límite superior – E3	78
Tabla 6.17 Derivas inelásticas Sistema Híbrido X-X $\alpha=0.5$ – Límite superior – E3	78
Tabla 6.18 Derivas inelásticas Sistema Híbrido Y-Y $\alpha=0.5$ – Límite superior – E3	78
Tabla 6.19 Desplazamientos Sistema Aislado X-X – Límite inferior – E1	84
Tabla 6.20 Desplazamientos Sistema Aislado Y-Y – Límite inferior – E1	84
Tabla 6.21 Desplazamientos Sistema Aislado X-X – Límite inferior – E2	85
Tabla 6.22 Desplazamientos Sistema Aislado Y-Y – Límite inferior – E2	85
Tabla 6.23 Desplazamientos Sistema Aislado X-X – Límite inferior – E3	85
Tabla 6.24 Desplazamientos Sistema Aislado Y-Y – Límite inferior – E3	85
Tabla 6.25 Desplazamientos Sistema Híbrido X-X $\alpha=0.15$ – Límite inferior – E1	86
Tabla 6.26 Desplazamientos Sistema Híbrido Y-Y $\alpha=0.15$ – Límite inferior – E1	86
Tabla 6.27 Desplazamientos Sistema Híbrido X-X $\alpha=0.5$ – Límite inferior – E1	86
Tabla 6.28 Desplazamientos Sistema Híbrido Y-Y $\alpha=0.15$ – Límite inferior – E1	87
Tabla 6.29 Desplazamientos Sistema Híbrido X-X $\alpha=0.15$ – Límite inferior – E2	87
Tabla 6.30 Desplazamientos Sistema Híbrido Y-Y $\alpha=0.15$ – Límite inferior – E2	87
Tabla 6.31 Desplazamientos Sistema Híbrido X-X $\alpha=0.5$ – Límite inferior – E2	88
Tabla 6.32 Desplazamientos Sistema Híbrido X-X $\alpha=0.5$ – Límite inferior – E2	88
Tabla 6.33 Desplazamientos Sistema Híbrido X-X $\alpha=0.15$ – Límite inferior – E3	88
Tabla 6.34 Desplazamientos Sistema Híbrido X-X $\alpha=0.15$ – Límite inferior – E3	89
Tabla 6.35 Desplazamientos Sistema Híbrido X-X $\alpha=0.5$ – Límite inferior – E3	89
Tabla 6.36 Desplazamientos Sistema Híbrido X-X $\alpha=0.5$ – Límite inferior – E3	89

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Variación del periodo natural en un edificio aislado.....	4
Figura 2.2 Componentes de un aislador LRB.....	5
Figura 2.3 Fuerza de corte vs Deformación lateral	6
Figura 2.4 Componentes del aislador HDRB	6
Figura 2.5 Modelo bilineal de aisladores elastoméricos	7
Figura 2.6 Aislador de péndulos friccionales.....	9
Figura 2.7 Apoyo deslizante con aislador elastomérico.....	9
Figura 2.8 Ciclo Fuerza-Desplazamiento: A) Metálico, B) Friccional y C) Autocentrante.....	10
Figura 2.9 Disipador metálico tipo ADAS	11
Figura 2.10 Conexión tipo SBC	11
Figura 2.11 Esquema del disipador friccional tipo Pall	12
Figura 2.12 Disipador de Energía de Fluido Viscoso	12
Figura 2.13 Distribución tipo Chevron	13
Figura 2.14 Distribución diagonal de los amortiguadores	13
Figura 2.15 Amortiguadores ubicados en la base de la estructura aislada.....	14
Figura 2.16 Idealización de un Sistema de un grado de libertad con Amortiguamiento Viscoso.....	14
Figura 2.17 Esquema de mecanismo de operación de sistema pasivo.....	16
Figura 2.18 Esquema de mecanismos de operación sistema activo.....	16
Figura 2.19 Componentes de un sistema de control activo.....	17
Figura 2.20 Componentes del sistema de control semi-activo.....	17
Figura 2.21 Aumento del período aumenta la demanda de desplazamiento	18
Figura 2.22 Efectividad de los amortiguadores.....	19
Figura 2.23 Esquema de un sistema híbrido de disipación de energía: Aisladores y amortiguadores sísmicos en base	19
Figura 2.24 Los amortiguadores de fricción de rotación en la base del edificio.....	20
Figura 2.25 Los amortiguadores de fricción de rotación en el nivel de la planta baja	21
Figura 2.26 Desplazamientos por niveles para una estructura de 8 pisos.....	21
Figura 2.27 Ratio de derivas para una estructura de 8 pisos	21
Figura 2.28 Desplazamientos al aumentar la altura de la estructura	22
Figura 2.29 Derivas al aumentar la altura de la estructura.....	22
Figura 3.1 Fuerzas laterales distribuidas en cada nivel del edificio	28
Figura 4.1 Esquema de desplazamiento DM y DTM	37
Figura 4.2 Valores de la Ec. (33) distribuidos en planta para el cálculo de DTM	37

Figura 4.3 Rendimiento esperado en relación con la categoría de riesgo y el nivel de movimiento del suelo	45
Figura 5.1 Modelo en la plataforma de aislamiento	49
Figura 5.2 Pantalla de ingreso de propiedades para elementos tipo <i>link</i>	50
Figura 5.3 Cambio hacia el tipo <i>link Gap</i> de los aisladores	50
Figura 5.4 <i>Link Damper – Exponential</i> para los amortiguadores de fluido viscoso.....	50
Figura 5.5 Modelo tridimensional de todas las estructuras.....	51
Figura 5.6 Vista de planta típica	52
Figura 5.7 Modelo tridimensional de las estructuras aisladas.....	53
Figura 5.8 Vista elevación del modelo aislado Eje 1	53
Figura 5.9 Distribución de los aisladores.....	54
Figura 5.10 Fuerza de restitución lateral.....	62
Figura 5.11 Modelo tridimensional de las estructuras híbridas.....	65
Figura 5.12 Vista elevación de los modelos híbridos – Eje 3.....	65
Figura 5.13 Distribución de los amortiguadores de fluido viscoso	65



LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 3.1 Espectros de los siete sismos escalados	32
Gráfico 3.2 Comparación Espectro promedio SRSS con el Espectro de la Norma E 0.31	33
Gráfico 3.3 Zona de verificación del Espectro promedio SRSS $0.75TM - 1.25TM$	33
Gráfico 4.1 Diagrama de flujo para diseño de aisladores sísmicos	34
Gráfico 4.2 Esquema de diseño de amortiguadores de fluido viscoso	38
Gráfico 4.3 Relación Fuerza - Velocidad en amortiguadores viscosos	40
Gráfico 4.4 Comparación de energía absorbida con diferentes exponentes de velocidad	41
Gráfico 4.5 Fuerza de amortiguamiento no lineal – Desplazamiento de respuesta	42
Gráfico 4.6 Eficiencia de amortiguación no lineal – Rigidez de Maxwell	42
Gráfico 5.1 Modelo bilineal nominal de los aisladores A y B (E1)	55
Gráfico 5.2 Modelo bilineal nominal de los aisladores A y B (E2)	55
Gráfico 5.3 Modelo bilineal nominal de los aisladores A y B (E3)	56
Gráfico 5.4 Modelo bilineal con propiedades modificadas aisladores A y B (E1)	57
Gráfico 5.5 Modelo bilineal con propiedades modificadas aisladores A y B (E2)	57
Gráfico 5.6 Modelo bilineal con propiedades modificadas aisladores A y B (E3)	57
Gráfico 5.7 Derivas del análisis modal espectral (E1)	59
Gráfico 5.8 Derivas del análisis modal espectral (E2)	59
Gráfico 5.9 Derivas del análisis modal espectral (E3)	59
Gráfico 5.10 Diagramas histéresis del Sistema de aislamiento X-X – Nominal – E1	61
Gráfico 5.11 Diagramas histéresis del Sistema de aislamiento X-X – Nominal – E2	61
Gráfico 5.12 Diagramas histéresis del Sistema de aislamiento X-X – Nominal – E3	61
Gráfico 5.13 Fuerzas restitutivas (%P) en todas las estructuras X-X – Límite inferior	62
Gráfico 5.14 Fuerzas restitutivas (%P) en todas las estructuras Y-Y – Límite inferior	63
Gráfico 5.15 Reducción promedio de desplazamiento en la base E1	67
Gráfico 5.16 Relación promedio de derivas E1	67
Gráfico 5.17 Relación promedio de fuerza basal E1	67
Gráfico 5.18 Reducción promedio de desplazamiento en la base E2	68
Gráfico 5.19 Relación promedio de derivas E2	68
Gráfico 5. 20 Relación promedio de fuerza basal E2	68
Gráfico 5.21 Reducción promedio de desplazamiento en la base E3	69
Gráfico 5.22 Relación promedio de derivas E3	69
Gráfico 5.23 Relación promedio de fuerza basal E3	69
Gráfico 5.24 Eficiencia promedio sistemas $\alpha = 0.15$ y 0.5 E1	70

Gráfico 5.25 Eficiencia promedio sistemas $\alpha = 0.15$ y 0.5 E2	70
Gráfico 5.26 Eficiencia promedio sistemas $\alpha = 0.15$ y 0.5 E3	71
Gráfico 6.1 Masa participante acumulada en el tercer modo – Base fija	72
Gráfico 6.2 Masa participante acumulada en el tercer modo – Diseño nominal	72
Gráfico 6.3 Masa participante acumulada en el tercer modo – Límite superior	73
Gráfico 6.4 Masa participante acumulada en el tercer modo – Límite inferior.....	73
Gráfico 6.5 Relaciones de derivas por nivel dirección X-X – Límite superior – E1	79
Gráfico 6.6 Relaciones de derivas por nivel dirección Y-Y – Límite superior – E1	79
Gráfico 6.7 Compilación derivas X-X – E1.....	79
Gráfico 6.8 Compilación derivas Y-Y – E1.....	80
Gráfico 6.9 Relaciones de derivas por nivel dirección X-X – Límite superior – E2	80
Gráfico 6.10 Relaciones de derivas por nivel dirección Y-Y – Límite superior – E2	80
Gráfico 6.11 Compilación derivas X-X – E2	81
Gráfico 6.12 Compilación derivas Y-Y – E2.....	81
Gráfico 6.13 Relaciones de derivas por nivel dirección X-X – Límite superior – E3	82
Gráfico 6.14 Relaciones de derivas por nivel dirección Y-Y – Límite superior – E3	82
Gráfico 6.15 Compilación derivas X-X – E3	82
Gráfico 6.16 Compilación derivas Y-Y – E3.....	83
Gráfico 6.17 Variación de relaciones de derivas respecto a las estructuras.....	83
Gráfico 6.18 Desplazamientos para cada sistema X-X – E1	90
Gráfico 6.19 Desplazamientos para cada sistema Y-Y – E1.....	90
Gráfico 6.20 Desplazamientos para cada sistema X-X – E2	91
Gráfico 6.21 Desplazamientos para cada sistema Y-Y – E2.....	91
Gráfico 6.22 Desplazamientos para cada sistema X-X – E3	92
Gráfico 6.23 Desplazamientos para cada sistema Y-Y – E3.....	92
Gráfico 6.24 Variación de reducción de desplazamientos base por estructura	93
Gráfico 6.25 Comportamiento de la Fuerza amortiguadora con el cambio de α	93
Gráfico 6.26 Razón de cambio de la fuerza basal promedio.....	94
Gráfico 6.27 Razón de cambio de derivas promedio	95
Gráfico 6.28 Razón de cambio de reducción de desplazamiento promedio	95
Gráfico 6.29 Fuerza restitutiva presente en los sistemas de análisis X-X (E1).....	96
Gráfico 6.30 Fuerza restitutiva presente en los sistemas de análisis Y-Y (E1)	97
Gráfico 6.31 Fuerza restitutiva presente en los sistemas de análisis X-X (E2).....	97
Gráfico 6.32 Fuerza restitutiva presente en los sistemas de análisis Y-Y (E2)	97
Gráfico 6.33 Fuerza restitutiva presente en los sistemas de análisis X-X (E3).....	98

Gráfico 6.34 Fuerza restitutiva presente en los sistemas de análisis Y-Y (E3)	98
Gráfico 6.35 Resultados promedios de Influencia en la Fuerza restitutiva	99
Gráfico 6.36 Envoltente histerético de todos los registros en cada sistema – E1.....	99
Gráfico 6.37 Envoltente histerético de todos los registros en cada sistema – E2.....	99
Gráfico 6.38 Envoltente histerético de todos los registros en cada sistema – E3.....	100
Gráfico 6.39 Reducción de la energía disipada Aislador A – Y-Y – Link K2 (E1)	100
Gráfico 6.40 Reducción de la energía disipada Aislador A – Y-Y – Link K2 (E2)	101
Gráfico 6.41 Reducción de la energía disipada Aislador A – X-X– Link K2 (E3).....	101
Gráfico 6.42 Resultados promedios en Variación de energía – Aislador A y B – X-X.....	102
Gráfico 6.43 Resultados promedios en Variación de energía – Aislador A y B – Y-Y.....	102



CAPÍTULO I: GENERALIDADES

1.1 Introducción

La ubicación geográfica del Perú se caracteriza por estar en una zona con alta sismicidad por su cercanía al borde de subducción entre las placas de Nazca y Sudamericana. Con los eventos ocurridos de manera reciente y teniendo la data de eventos pasados, se observa la necesidad de tomar precauciones respecto al diseño estructural a fin de reducir la vulnerabilidad sísmica.

El principio de diseño tradicional de las estructuras antisísmicas se basa en aceptar el daño y la pérdida de funcionalidad. Es decir, cada elemento de la estructura es capaz de resistir las fuerzas sísmicas con suficiente plasticidad para absorber la energía de vibración provocada por el terremoto. En este caso, se obtiene una gran deformación plástica en los elementos estructurales, lo que puede ocasionar estructuras irreparables.

Por ello, toda estructura debe ser diseñada para que cumpla con el desempeño exigido en la norma ante cierto tipo de solicitaciones. Dependiendo del tipo de edificación en que se clasifique, el nivel de aceptación de daño cambiará.

Ante solicitaciones grandes el diseño tradicional no garantiza la funcionabilidad de la superestructura, es necesario optar por otras alternativas de protección que aseguren el funcionamiento de las edificaciones en caso de una emergencia.

La eficacia de los sistemas de protección ha permitido su desarrollo a lo largo del mundo al reducir la vulnerabilidad sísmica. Los sistemas pasivos son los comúnmente usados en la actualidad, entre los que destacan el aislamiento sísmico y los disipadores de energía.

“Los sistemas de aislamiento sísmico son la alternativa más viable y con mayor amplia gama de aplicación” (ATC 17-1, 1993) para garantizar que las edificaciones queden prácticamente sin daño. De acuerdo a la realidad peruana, aún es reducido el análisis de alternativas de estos sistemas de protección y la presencia de grupos de especialistas en estos temas. La publicación de lineamientos sobre aislamiento sísmico, Norma Técnica Peruana E.031, es reciente; previamente todas las edificaciones con estos sistemas fueron diseñadas con normas extranjeras.

A pesar de la efectividad del aislamiento sísmico, aún presenta limitaciones relacionadas a los dispositivos que lo conforman. En consecuencia, está presente la necesidad de realizar estudios sobre nuevas alternativas que optimicen sus propiedades y se adapten de manera adecuada a las condiciones de nuestro país.

La importancia del aislamiento sísmico radica en la variación de la flexibilidad de la estructura. El periodo se incrementa y produce un gran desplazamiento en la interfaz de aislamiento, lo cual va ligado a las limitaciones de los aisladores. Es posible reducir este valor con la adición de amortiguadores sísmicos en la interfaz.

En síntesis, se necesita diversos estudios de sistemas de protección sísmica adaptadas para las condiciones del país con el fin de disponer de mayores alternativas de selección. La presente tesis propone un nuevo método, el sistema híbrido de disipación de energía, conformado por la interacción de aisladores sísmicos y amortiguadores en la base del edificio. Las ventajas de este sistema se explicarán en términos de comparación con el sistema de aislamiento sísmico.

1.2 Metodología de trabajo

Se explicará el desarrollo de este proyecto, describiendo el propósito de cada capítulo y las relaciones entre las mismas.

El Capítulo 2 contiene la revisión de literatura especializada referente a los tipos de sistemas de control, características de los aisladores y amortiguadores sísmicos. Se define el comportamiento esperado para el sistema híbrido. La finalidad es conocer los elementos que serán empleados.

El Capítulo 3 contiene la revisión de literatura especializada referente al análisis de las estructuras con aislamiento sísmico y con el sistema híbrido. La finalidad es poder parametrizar consideraciones de los elementos que conformarán los sistemas y los métodos de análisis.

El Capítulo 4 contiene los criterios de diseño de los dispositivos. Para el diseño de los aisladores LRB se usará los criterios de la Norma Técnica Peruana E.031 y la norma ASCE 7-16. En el caso del diseño de los amortiguadores se utilizará el análisis de eficiencia (E), método propuesto en la tesis.

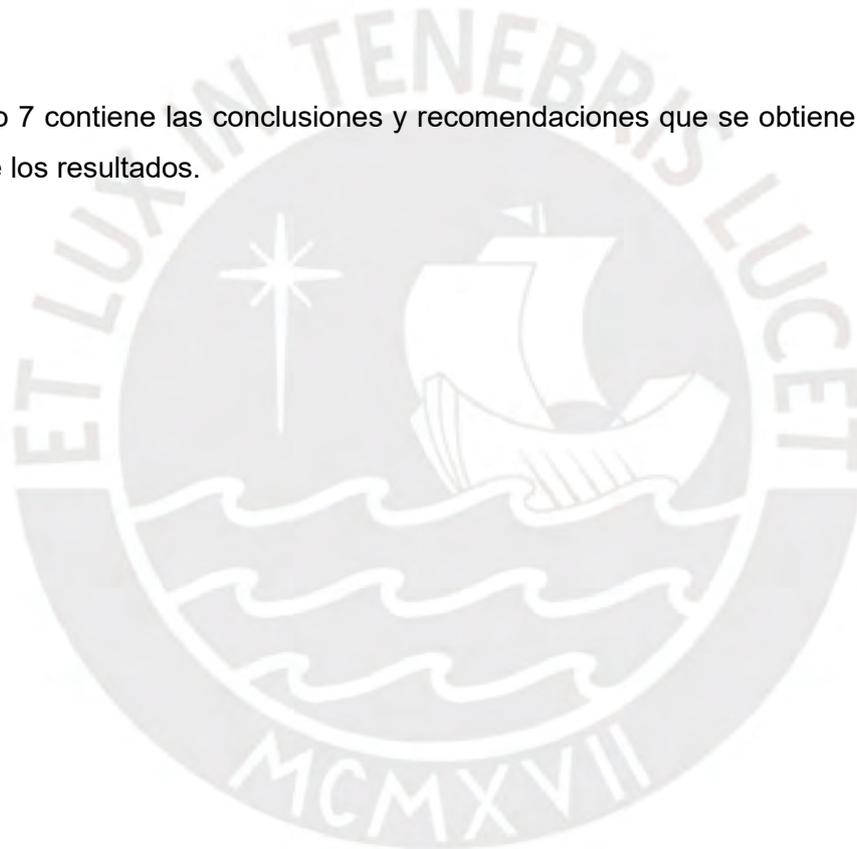
El proyecto abarca el análisis de tres estructuras: $E1$, $E2$ y $E3$. Para cada una, se realiza el diseño del sistema aislado sin modificar los elementos estructurales. Los sistemas híbridos se definen a partir de análisis respecto a los sistemas aislados, se mantiene el mismo concepto de no variar ningún elemento del sistema previo.

En el Capítulo 5 se materializa las consideraciones de los capítulos previos, referido al diseño de los sistemas:

- Se define las características de las estructuras, estas siguen los parámetros detallados en el Capítulo 3. No se diseñará los elementos estructurales.
- Se presentará las propiedades finales de los dispositivos: aisladores LRB y amortiguadores de fluido viscoso, diseñados con los criterios del Capítulo 4.
- Se utilizará los conceptos del Capítulo 4 para evaluar la eficiencia de las estructuras. Este análisis sirve para el diseño del amortiguador, el cual consiste en definir el valor de amortiguamiento óptimo y así escoger la estructura híbrida con el que se comparará los resultados.

En el Capítulo 6 se analizan todas las estructuras mediante del modelamiento dinámico con los siguientes sistemas: estructuras con aislamiento sísmico y con el sistema híbrido.

El Capítulo 7 contiene las conclusiones y recomendaciones que se obtienen luego del análisis de los resultados.



CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

En este capítulo se desarrolla el marco teórico de los elementos involucrados en el sistema híbrido de disipación de energía.

2.1 Aisladores sísmicos

Estos dispositivos presentan gran flexibilidad lateral y se colocan en la interfaz de aislamiento, que es la plataforma ubicada entre la superestructura y el suelo. El resultado es que la “estructura aislada vibra como un bloque sólido mientras se produce un gran desplazamiento en la base” (Barmo, Mualla y Hasan, 2014). La **Figura 2.1** muestra el cambio de periodo de una estructura con aislación.

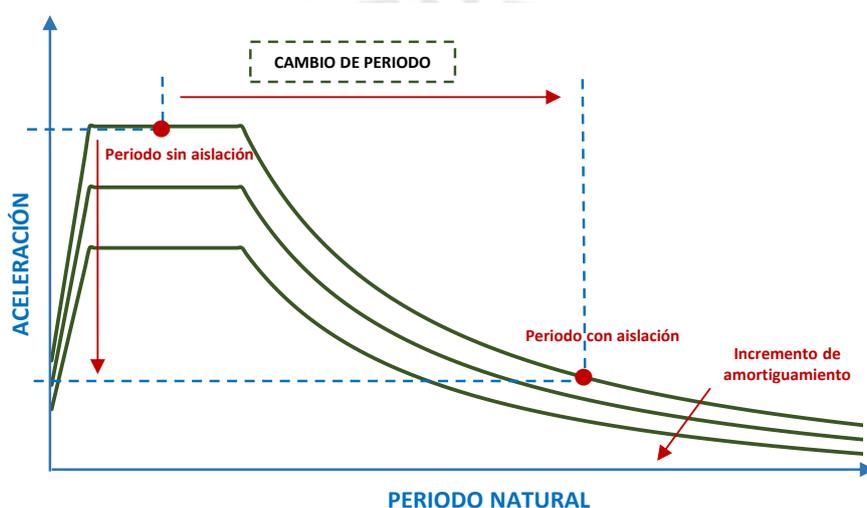


Figura 2.1 Variación del periodo natural en un edificio aislado
Adaptado de (Barmo, Mualla, Hasan, 2014)

En general, el uso de estos dispositivos reduce de manera significativa el efecto en la estructura causado por el terremoto. Los aisladores deslizantes y elastoméricos se consideran actualmente entre los más desarrollados y comerciales. A continuación, se explicará las distintas variantes que presenta cada uno.

2.1.1 Aisladores elastoméricos

El mecanismo de estos dispositivos está conformado por láminas planas elastoméricas intercaladas con láminas de acero y están recubiertas por una capa de caucho superficial. La distribución usual es en secciones circulares y cuadradas.

La funcionalidad de estos aisladores está relacionada a su flexibilidad lateral, ya que es necesario permitir un gran desplazamiento horizontal entre la estructura aislada y la superficie del suelo. La finalidad es lograr una mayor disipación de energía mediante los

aisladores y no por medio de la superestructura. Solo una pequeña parte de la energía original será disipada por esta, lo que proporciona una mejora en el desempeño. Dando como resultado que “las aceleraciones de la respuesta estructural son inferiores a las percibidas en el suelo” (Skinner, Kelly y Robinson, 2011).

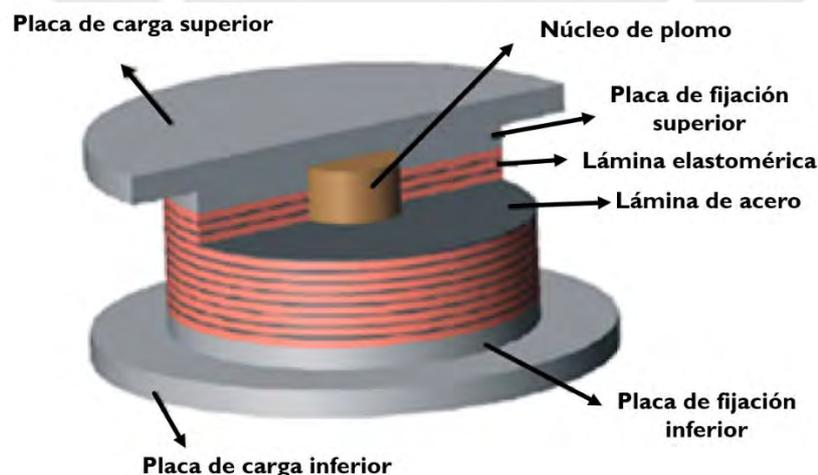
A continuación, serán detallados los aisladores elastoméricos con núcleo de plomo (LRB) y de alto amortiguamiento (HDRB) debido a la relevancia que tienen en el país.

2.1.1.1 Aisladores elastoméricos con núcleo de plomo (LRB)

Adicional a la alternación entre láminas de acero y láminas elastoméricas, presentan un núcleo de plomo en el centro de su mecanismo que mejora en gran medida sus propiedades restitutivas y de amortiguación. También es usual la presencia de un caucho interno, el cual cumple la función de actuar como resorte que otorga aún mayor amortiguamiento al dispositivo.

La modificación del diámetro del tapón de plomo varía la capacidad de amortiguamiento de este elemento. Por ende, “en los aisladores LRB se permiten valores que oscilan entre el 25 al 30%” (Cámara Chilena de la Construcción, 2011). Debido a que estos dispositivos presentan estas magnitudes, son ideales por temas de espacio.

Después de un evento sísmico la estructura retorna a su posición inicial, conjuntamente a esto “el núcleo de plomo se va recristalizando y queda listo para una nueva sollicitación” (Cámara Chilena de la Construcción, 2011). En la **Figura 2.2** se aprecia los elementos del LRB y en la **Figura 2.3** se observa el ciclo histerético de este dispositivo.



*Figura 2.2 Componentes de un aislador LRB
Adaptado de (Andrade, Tuxworth, 2009)*

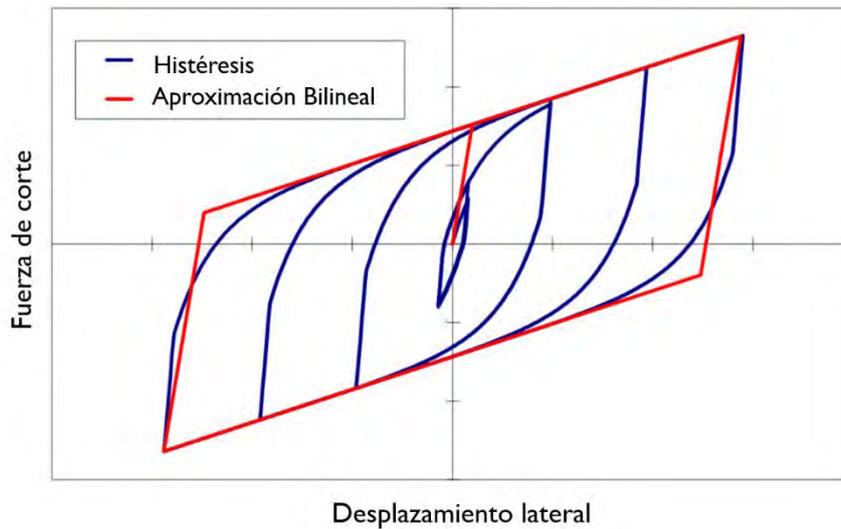


Figura 2.3 Fuerza de corte vs Deformación lateral
Adaptado de (Skinner, Kelly, 2011)

2.1.1.2 Aisladores elastoméricos de alto amortiguamiento (HDRB)

Las láminas elastoméricas de este aislador son fabricadas agregando otros elementos para incrementar su amortiguamiento, “este valor oscila entre 10 y el 20%” (Skinner, Kelly, 2011). Son más sensibles a cambios de temperaturas a comparación de otros tipos de aisladores.

La rigidez de estos dispositivos aumenta en los ciclos de carga iniciales, el cual se estabiliza desde el tercero. Este incremento de rigidez le proporciona ser rígido ante sismos pequeños y una respuesta casi lineal para niveles de diseño ya definidos.

“Para deformaciones de corte entre 20 y 120% el módulo de corte es bajo y constante, pero a mayores este valor se incrementa debido al aumento de energía disipada” (Cámara Chilena de la Construcción, 2011). La Figura 2.4 detalla sus elementos.

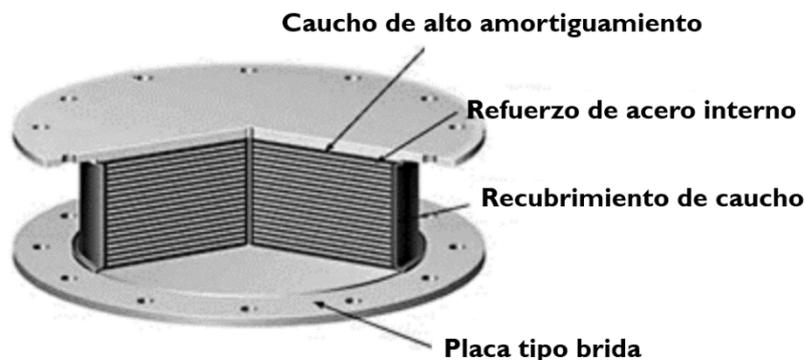


Figura 2.4 Componentes del aislador HDRB
Adaptado de (Higashino, Okamoto, 2006)

2.1.1.3 Comportamiento de aisladores elastoméricos

Se representa mediante un modelo bilineal, el cual involucra diferentes parámetros correspondientes a las propiedades inherentes de estos dispositivos. La **Figura 2.5** muestra este modelo con todas las variables correspondientes.

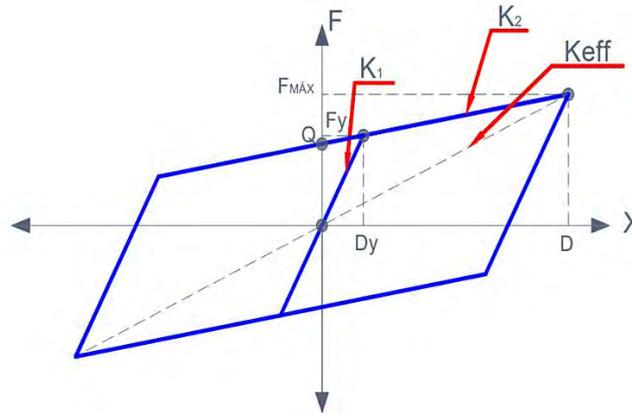


Figura 2.5 Modelo bilineal de aisladores elastoméricos
Tomado de (Muñoz, 2016)

El parámetro de K_1 es la rigidez inicial y K_2 la rigidez post fluencia. La rigidez inicial usualmente es determinada mediante diagramas histeréticos obtenidos en ensayos de laboratorio, también se estima mediante un factor que relaciona estos valores.

F_y es la fuerza de fluencia, D_y el desplazamiento de fluencia y Q es la resistencia característica del aislador, "el cual para aisladores de núcleo de plomo depende generalmente del esfuerzo de fluencia del plomo y el área del núcleo" (Kelly, 2001). Por último, $F_{máx}$ es fuerza máxima y A_B el área del modelo bilineal.

$$F_y = K_1 D_y \quad (1)$$

$$F_y = Q + K_2 D_y \quad (2)$$

$$F_{máx} = F_y + K_2 (D - D_y) \quad (3)$$

$$A_B = 4Q(D - D_y) \quad (4)$$

La construcción del modelo se obtiene empleando estos parámetros: rigidez efectiva (K_{eff}), amortiguamiento efectivo (β_{eff}) y D . Para el modelo elástico la fuerza máxima y área se determinan por:

$$F_{máx} = K_{eff} D \quad (5)$$

$$A = 2\pi\xi K_{eff} D^2 \quad (6)$$

De ambas ecuaciones se obtiene:

$$K_{eff}D = K_1D_y + K_2(D - D_y) \quad (7)$$

$$2\pi\xi K_{eff}D^2 = 4Q(D - D_y) \quad (8)$$

Para el cálculo total de todas las variables se necesita una ecuación adicional, por ello es práctico utilizar la relación entre las pendientes K_1 y K_2 :

$$K_1 = \alpha K_2 \quad (91)$$

El valor de α es definido por el fabricante y “oscila entre valores de 7 a 15” (Muñoz, 2016). Al incluir esta última ecuación se obtiene:

$$2\pi\xi D - \frac{4D_y(\alpha - 1)(D - D_y)}{D + (\alpha - 1)D_y} = 0 \quad (10)$$

$$K_2 = \frac{DK_{eff}}{D + (\alpha - 1)D_y} \quad (11)$$

2.1.2 Aisladores deslizantes

Estos dispositivos disipan la energía sísmica por fuerzas de rozamiento que se generan en los mismos elementos durante un evento sísmico. Condiciones como la velocidad de movimiento, temperatura, presión producida por el contacto, limpieza, rugosidad y tiempo de estancia afectan la fricción. El funcionamiento está directamente ligado a este parámetro.

Se requiere “mayor mantenimiento y cuidado, cualquier modificación en las superficies altera el coeficiente de fricción utilizado para el diseño” (Cámara Chilena de la Construcción, 2011). Su principal deficiencia es el regreso a su posición inicial; en consecuencia, este tipo de aisladores son diseñados en conjunto de otros mecanismos o sistemas restitutivos como lo son los aisladores elastoméricos.

2.1.3.1 Péndulos friccionales (FPS)

Este sistema “presenta un deslizador articulado que se mueve sobre una superficie esférica de acero inoxidable” (Naeim, Kelly, 1999) y la fricción entre estos genera amortiguamiento en el aislador.

Son aisladores autocentrantes, a diferencia de los apoyos deslizantes. Es decir, la estructura tiende a volver a su posición original después de un evento sísmico. Su distribución geométrica es útil para este comportamiento, debido a que funciona de

manera adecuada con las fuerzas de gravedad. Así mismo, es necesario para que el desplazamiento no se exceda durante un sismo. La **Figura 2.6** muestra un aislador FPS típico.

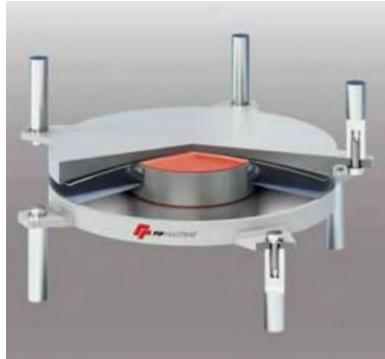


Figura 2.6 Aislador de péndulos friccionales

Tomado de. (Cámara Chilena de la Construcción, 2011)

2.1.3.2 Apoyos deslizantes planos

Están conformados por dos superficies, que “son de acero inoxidable y un material polimérico de baja fricción” (*Cámara Chilena de la Construcción, 2011*), donde una está adherida a la superestructura y la siguiente a la interfaz. La baja capacidad de fricción permite el desplazamiento horizontal y soportar cargas verticales.

Usualmente son combinados con otros dispositivos, aisladores LRB, de esta manera controlar el retorno a la posición original de la estructura y así evitar la deformación posterior al terremoto. En la **Figura 2.7** se observa esta combinación.



Figura 2.7 Apoyo deslizante con aislador elastomérico

Tomado de. (Cámara Chilena de la Construcción, 2011)

2.2 Amortiguadores sísmicos

Estos dispositivos no libran a la estructura de la transferencia de movimientos y fuerzas sísmicas provenientes de la superficie. “Su introducción proporciona amortiguación a los

elementos estructurales, hace posible una transmisión mínima de los movimientos dañinos del suelo” (Shanmuga, Cinithia, Umesha y Nagesh, 2014).

Los sistemas de disipación conducen directamente la energía sísmica hacia los amortiguadores. Estos producen una modificación en los elementos estructurales respecto a sus propiedades dinámicas de amortiguación, como resultado los dispositivos absorben las vibraciones de excitación sísmica.

Son clasificados respecto a sus métodos de activación: por desplazamientos, velocidades o por una combinación de las dos opciones mencionadas. La **Figura 2.8** muestra las gráficas por los ciclos de carga y deformación de dispositivos activados por desplazamiento siendo: dispositivos metálicos, friccionales y autocentrantes.

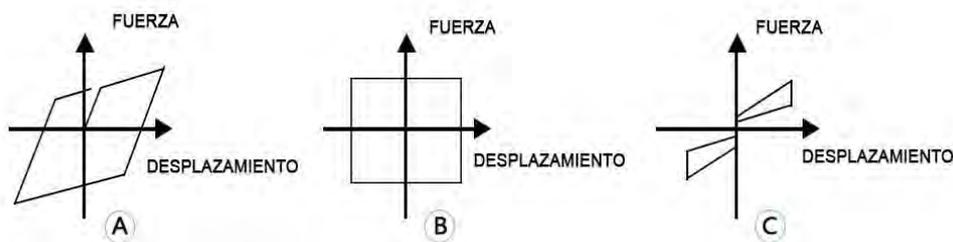


Figura 2.8 Ciclo Fuerza-Desplazamiento: A) Metálico, B) Friccional y C) Autocentrante
Adaptado de (Cámara Chilena de la Construcción, 2011)

Entre los principales disipadores se encuentran los metálicos, de fricción y de fluido viscoso. Los primeros “disipan energía a través de la plastificación de los metales, los de fricción, mediante fricción deslizando y los amortiguadores de fluido viscoso por el flujo de fluidos a través de orificios” (Shanmuga et al, 2014).

2.2.1 Amortiguadores metálicos

El grado de disipación de estos elementos está relacionado con la “fluencia de los metales que los conforman, sometidos a esfuerzos de flexión, torsión, corte o una combinación entre estas” (Cámara Chilena de la Construcción, 2011).

Su comportamiento es fácil de predecir, ya que se considera estable y confiable a lo largo del periodo. En consecuencia, estos tienen un adecuado comportamiento ante factores ambientales como puede ser temperatura y el tiempo.

La utilización común de disipadores tipo ADAS, “Added Damping/ Added Stiffness”, se debe a que los “materiales empleados en su fabricación son de uso frecuente en construcción” (Cámara Chilena de la Construcción, 2011). Trabajan de manera directa

con los momentos; a consecuencia, existe un cambio de sección en la parte central donde los momentos flectores son casi nulos.

La **Figura 2.9** muestra un disipador metálico tipo ADAS, donde se observa su distribución geométrica que va de acuerdo a su funcionamiento.

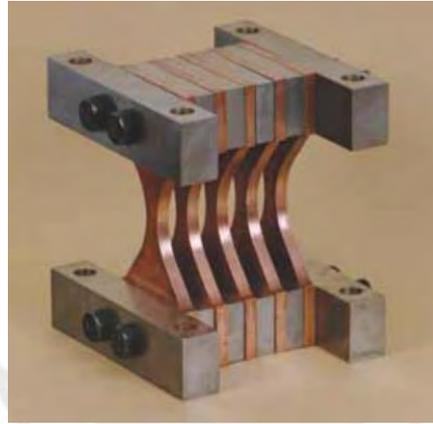


Figura 2.9 Disipador metálico tipo ADAS

Tomado de (Cámara Chilena de la Construcción, 2011)

2.2.2 Amortiguadores friccionales

Este dispositivo consta de “varias placas de acero que hacen contacto unas contra otras en direcciones opuestas, produciendo fricción entre sus partes y así disipando energía” (Mualla, 2000). Si ante la sollicitación sísmica no se alcanza un determinado nivel de carga de diseño, estos dispositivos se mantienen inactivos.

“El principal inconveniente en estos dispositivos es la incertidumbre en su activación, ya que trabajan con las deformaciones que se producen en la estructura” (Cámara Chilena de la Construcción, 2011). La **Figura 2.10** detalla la conexión tipo SBC friccional, el cual consiste en la combinación de placas de acero conectas por pernos y láminas de alta resistencia. Los orificios ovalados propician el deslizamiento de las placas.

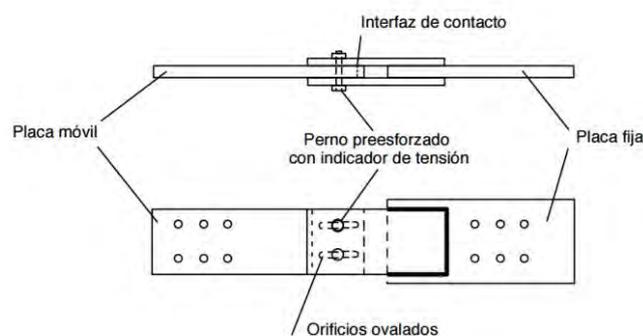
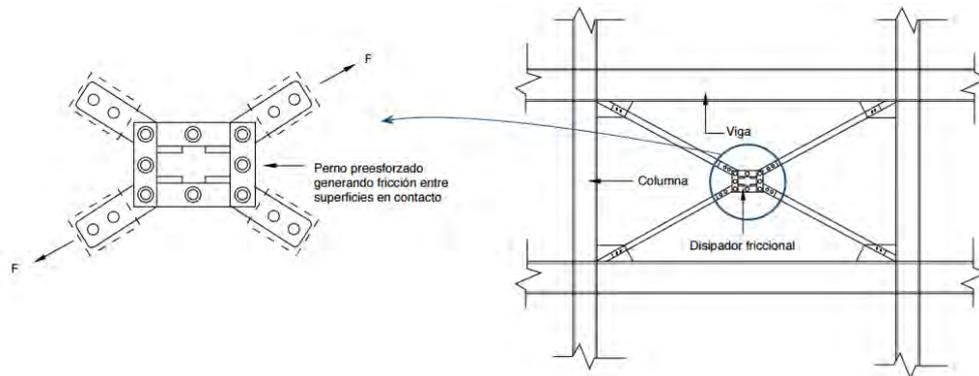


Figura 2.10 Conexión tipo SBC

Tomado de (Cámara Chilena de la Construcción, 2011)

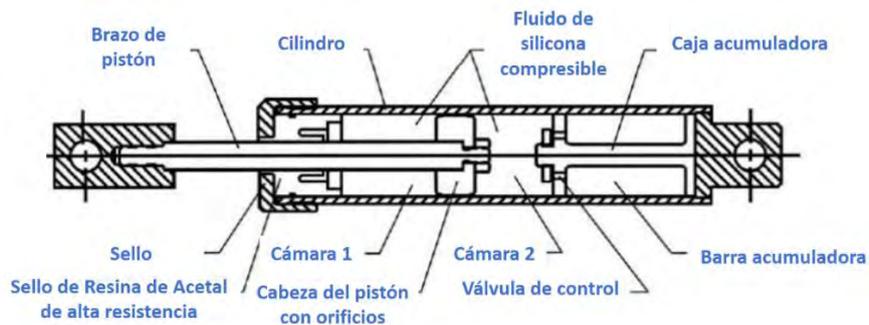
La **Figura 2.11** muestra el sistema Pall, que utiliza como medio de disipación la deformación relativa de entrepiso y la deformación angular del dissipador friccional.



*Figura 2.11 Esquema del dissipador friccional tipo Pall
Tomado de (Cámara Chilena de la Construcción, 2011)*

2.2.3 Amortiguadores de fluido viscoso (FVDs)

Este amortiguador contiene fluidos de alta viscosidad, resistentes al fuego no siendo inflamables; tales como siliconas, aceites, entre otros. La disipación de energía se produce al forzar el paso de estos fluidos a través de orificios, “la fuerza de resistencia que se opone al movimiento es proporcional a la velocidad aplicada” (Makris, 1997). La **Figura 2.12** muestra los elementos de este dissipador.



*Figura 2.12 Amortiguador de Fluido Viscoso
Adaptado de (Taylor Devices, 2004)*

El líquido del interior se comprime en la Cámara 1 y luego se devuelve hacia la Cámara 2 a través de los orificios, esto genera la presión del pistón contra el cilindro y produce una fuerza de amortiguación para equilibrarla. Estos orificios se dividen por tamaño y número para proporcionar la respuesta requerida. La válvula de control “descarga parcialmente el líquido en la Cámara 3 de acumulación para prevenir el efecto rebote” (Taylor Devices, 2004).

Una de las características distintivas de los amortiguadores de fluidos viscosos en comparación con otros dispositivos es que “funcionan en una amplia gama de temperaturas. Se ha demostrado que su comportamiento no presenta grandes diferencias en un rango de temperatura de -40 y 70°C ” (Taylor Devices, 2004).

En construcción, se utilizan para reducir la carga provocada por la estimulación sísmica. Se colocan estratégicamente dentro de la estructura para que puedan operar durante el movimiento relativo entre dos pisos adyacentes. Los métodos de instalación varían de acuerdo a la distribución de los amortiguadores en la estructura.

La distribución horizontal de estos amortiguadores es utilizada para una adhesión flexible entre “vértice de unión de las diagonales en forma de “V” invertida, fijada en un piso inferior, con el nivel inmediato superior” (Taylor Devices, 2020).

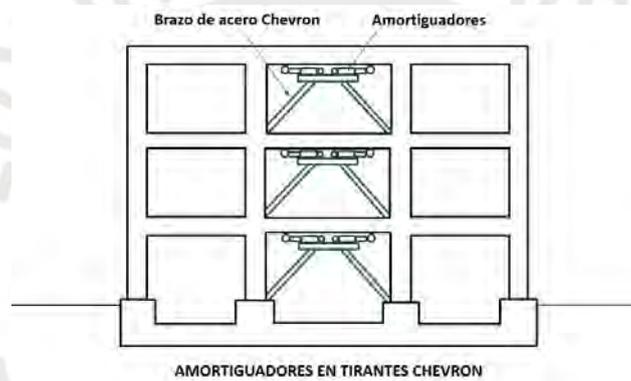


Figura 2.13 Distribución tipo Chevron
Adaptado de (Taylor Devices, 2020)

Al distribuir estos dispositivos en diagonales inclinadas, las dos conexiones viga-columna opuestas en los dos pisos adyacentes están continuamente interconectadas.

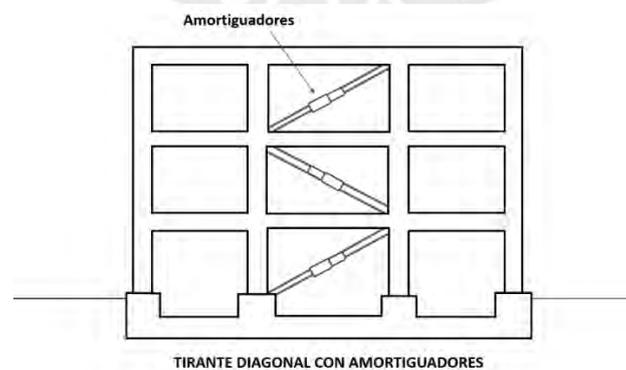


Figura 2.14 Distribución diagonal de los amortiguadores
Adaptado de (Taylor, 2020)

En estas distribuciones no se proporciona rigidez estática, las fuerzas de amortiguación están desfasadas con el desplazamiento, por lo que no aumentarían las fuerzas del piso y las aceleraciones.

Al colocar estos elementos de manera horizontal en distintos puntos de la interfaz de aislamiento, se reduce el desplazamiento producido en la misma. Este principio es el objetivo del sistema híbrido de disipación de energía. En la **Figura 2.15** se aprecia la ubicación de los amortiguadores para esta distribución.

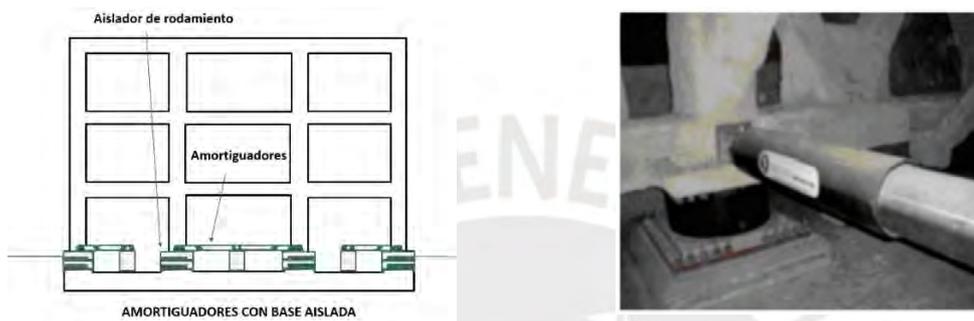


Figura 2.15 Amortiguadores ubicados en la base de la estructura aislada
Adaptado de (Taylor, 2020)

2.2.3.1 Amortiguamiento viscoso

“El amortiguamiento viscoso es el tipo de idealización más utilizada, con el cual es posible representar satisfactoriamente el comportamiento vibratorio de las estructuras reales con una complicación matemática mínima” (Ruiz, 1974). La **Figura 2.16** detalla el comportamiento idealizado de la estructura.

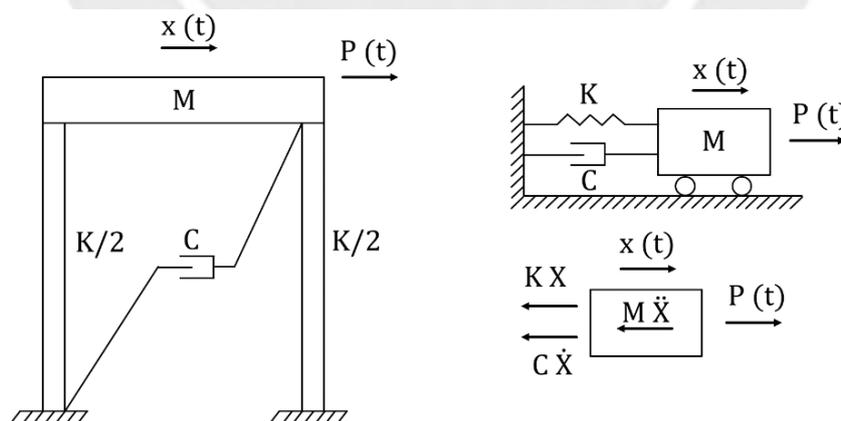


Figura 2.16 Idealización de un Sistema de un grado de libertad con Amortiguamiento Viscoso
Tomado de (Chopra, 2016)

El movimiento de vibración libre se rige por ecuaciones que involucran el equilibrio dinámico de las cargas actuantes en la masa “M” y al asumir vibración libre $P(t) = 0$:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + bx = 0 \quad (12)$$

$$\ddot{x} + 2\xi\omega\dot{x} + \omega^2x = 0 \quad (13)$$

Donde:

ω : Frecuencia natural de vibración del sistema (*rad/seg*)

ξ : Razón de amortiguamiento crítico, relación entre el coeficiente de amortiguación (*c*) y la amortiguación crítica (c_{cr}).

$$\xi = \frac{c}{c_{cr}} = \frac{c}{2m\omega} \quad (14)$$

La máxima magnitud de “*c*” corresponde al “ c_{cr} ” y está dado por la siguiente expresión:

$$c_{cr} = 2m\omega = 2\sqrt{km} = \frac{2k}{\omega} \quad (152)$$

2.3 Sistemas de control de respuesta

Corresponden a diferentes dispositivos adaptados a las estructuras para que disipen gran cantidad de la energía sísmica y liberar a los elementos estructurales de esta función. Se presentan en diversas distribuciones, desde diseños simples hasta avanzados elementos automatizados.

2.3.1 Sistema de control pasivo

Los sistemas pasivos incluyen una variedad de materiales y dispositivos para mejorar la amortiguación, rigidez y resistencia de una estructura. “Se utilizan tanto para mitigar el peligro sísmico como para la restauración de las mismas” (*Soong, Spencer Jr., 2002*).

Los dispositivos mecánicos, como los aisladores y amortiguadores sísmicos, están adicionados a la estructura. Estos elementos absorben gran parte de la energía sísmica transmitida, aminoran la demanda en los miembros estructurales de la edificación. “Es el sistema más utilizado actualmente” (*Cámara Chilena de la Construcción, 2011*).

No se contempla algún sistema automatizado o dependientes de energía para que funcionen. La **Figura 2.17** detalla de manera esquemática su funcionamiento.



Figura 2.17 Esquema de mecanismo de operación de sistema pasivo
Adaptado de (Soong, Spencer Jr., 2002)

2.3.2 Sistema de control activo

Los sistemas activos utilizan controladores inteligentes para detectar la respuesta estructural, como las derivas y rotaciones. Los sensores reciben esa información y mediante algoritmos de control procesan los datos con el fin de aplicar fuerzas necesarias mediante dispositivos especiales, de esta manera contrarrestar y minimizar la respuesta del edificio.

Es síntesis, “los actuadores aplican las fuerzas sobre masas, elementos de arriostre o tendones activos” (Cámara Chilena de la Construcción, 2011), mediante esta acción se modifica las propiedades del edificio. La **Figura 2.18** detalla el funcionamiento del sistema activo.

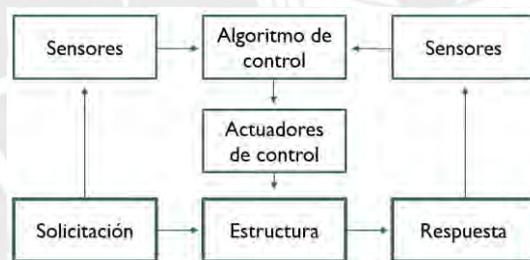


Figura 2.18 Esquema de mecanismos de operación sistema activo
Adaptado de (Soong, Spencer Jr., 2002)

Los dispositivos correspondientes a este sistema “requieren un suministro relativamente grande de potencia para generar las fuerzas activas” (Barmo et al, 2014). Lo cual representa una gran desventaja, en caso de una deficiencia en el abastecimiento de energía dejan de funcionar. La **Figura 2.19** detalla componentes del sistema distribuidos en la estructura.

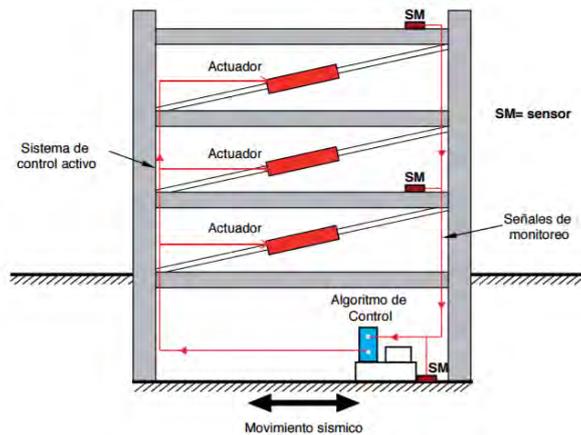


Figura 2.19 Componentes de un sistema de control activo
Tomado de (Cámara Chilena de la Construcción, 2011)

2.3.3 Sistemas de control semi activo

En estos sistemas también se monitorean las respuestas estructurales en tiempo real mediante sus mecanismos. Sin embargo, “a diferencia de los sistemas activos, no aplican las fuerzas de control directamente a la estructura. En su lugar, se enfoca en la modificación de las propiedades de los dispositivos” (Cámara Chilena de la Construcción, 2011).

Requieren una menor a cantidad de energía externa en comparación de los sistemas activos, es un punto favorable porque pueden funcionar con la energía de una batería. “Estos sistemas tienen un mejor rendimiento que los dispositivos pasivos y en muchas ocasiones mejor que los activos” (Ahumada, 2010). La Figura 2.20 detalla componentes del sistema semi activo distribuidos en la estructura.

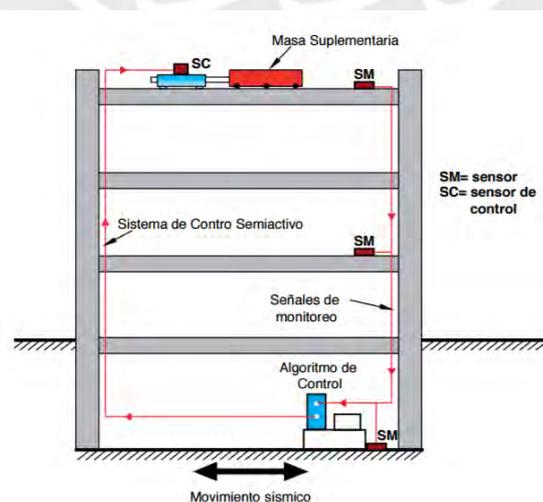


Figura 2.20 Componentes del sistema de control semi-activo
Tomado de (Cámara Chilena de la Construcción, 2011)

2.4 Sistema híbrido de disipación de energía

Se presentan dos conceptos para la denominación de un sistema híbrido: el primero referido a la combinación de sistemas de control activos con pasivos, un ejemplo es la interacción de amortiguadores de masa híbridos. “La parte activa del sistema se utiliza para influir en la respuesta del dispositivo de control pasivo” (Riley, Reinhorn, Nagarajaiah, 1998).

El otro sistema, que analizará en este proyecto, comprende la adición de amortiguadores sísmicos en la base del sistema aislado. El propósito es conocer en qué términos la interacción de estos sistemas mejoran la respuesta de la estructura.

2.4.1 Sistema híbrido de disipación de energía: LRB y FVDs

El sistema de aislamiento sísmico es utilizado para proteger instalaciones críticas y sus operaciones. Este objetivo no varía en el sistema híbrido; además, se enfoca en reducir el gran desplazamiento generado en el aislamiento sísmico.

Este desplazamiento, en una estructura aislada, es producido al separar la estructura del movimiento del suelo mediante dispositivos que son rígidos al movimiento vertical pero flexibles al movimiento horizontal. La estructura se flexibiliza y por ende el periodo vibración aumenta. La **Figura 2.21** indica que a mayor periodo la demanda de desplazamiento crece.

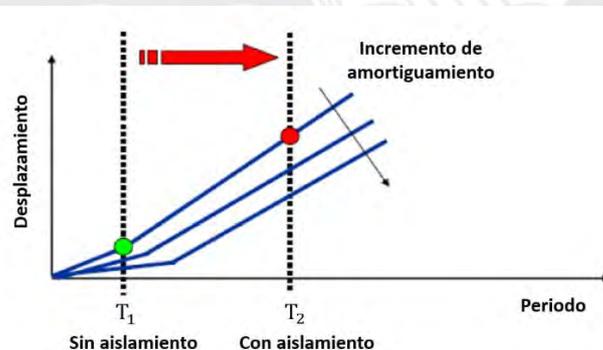


Figura 2.21 Aumento del período aumenta la demanda de desplazamiento

Adaptado de (Barmo et al, 2014)

En el presente estudio el sistema aislado utiliza “aisladores elastoméricos de núcleo de plomo (LRB) que requieren un costo inicial y mantenimiento mínimo comparado a otros dispositivos pasivos” (Kelly, 1997).

Los grandes desplazamientos laterales y cargas axiales “influyen en la carga crítica del aislador, su rigidez lateral, el amortiguamiento, su geometría y posibilidad a la volcadura” (Nagarajaiah, Ferrel, 1999). El objetivo de la reducción que propone el sistema híbrido

está ligado al control de los problemas potenciales de los aisladores. Se empleará la adición de amortiguadores de fluido viscoso (FVDs) para lograr esta disminución. La **Figura 2.22** detalla la efectividad de estos amortiguadores al reducir desplazamientos.

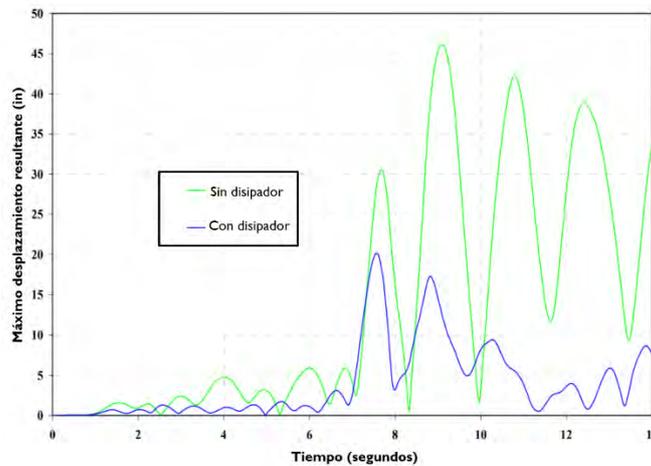


Figura 2.22 Efectividad de los amortiguadores
Fuente. Adaptado de (Hussain, Mohamed, 2008)

Lo que se plantea estudiar es el cambio del comportamiento de la estructura con el sistema híbrido, respecto al sistema aislado y la manera en que es más beneficioso. Se elaboró la siguiente **Figura 2.23** que muestra un esquema idealizado para el modelamiento del sistema híbrido de disipación de energía.

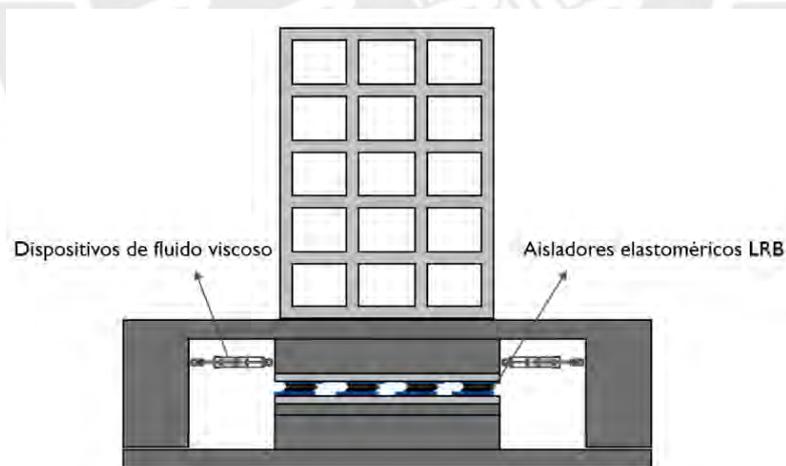


Figura 2.23 Esquema de un sistema híbrido de disipación de energía: Aisladores y amortiguadores sísmicos en base

Los problemas potenciales que desarrollan los aisladores van relacionados con su ciclo de vida. Se produce el deterioro del núcleo de plomo por varios ciclos de desplazamiento alto que se da en el mismo, a mayor desplazamiento que experimentan su capacidad portante disminuye. A consecuencia, se produce el aumento de dimensiones en el

diseño, “estas geometrías costosas van en contra del objetivo del sistema aislado que es llegar a una solución práctica y económica” (Providakis, 2007)

Otro problema es su rendimiento en condiciones de levantamiento, el cual acrecienta en desplazamientos grandes. En condiciones de carga dinámica severa se puede presentar aisladores traccionados. El diseño adecuado de los brazos rígidos, que componen a los amortiguadores, “reduce las fuerzas de tensión en las esquinas de la edificación, donde hay más probabilidad de levantamiento” (Hussain, Mohamed, 2008).

La reducción en el desplazamiento dinámico, posiblemente hasta en 30% (valor extraído de la **Tabla 2.1**), permite efectivizar el área de construcción que está limitada en los sistemas aislados por juntas de grandes valores.

2.4.1.1 Comportamiento del Sistema Híbrido de disipación de Energía

Se presentará resultados del estudio “*The Behavior of Multi-Story Buildings Seismically Isolated System Hybrid Isolation*” (Barmo et al, 2014) donde se estudia la respuesta estructural de un sistema híbrido compuesto por aisladores LRB (aisladores con núcleo de plomo), FSB (aisladores deslizantes planos) y la adición de amortiguadores FD (de fricción de rotacional).

Esta respuesta es comparada con análisis para la estructura con base fija y el sistema aislado (LRB+FSB). El sistema híbrido comprende la ubicación de los amortiguadores en la base (LRB+FSB+FD) y en la primera planta (LRB+FSB+FD1). La **Figura 2.24** muestra la ubicación de los amortiguadores junto a los aisladores y en la **Figura 2.25** están en la primera planta.

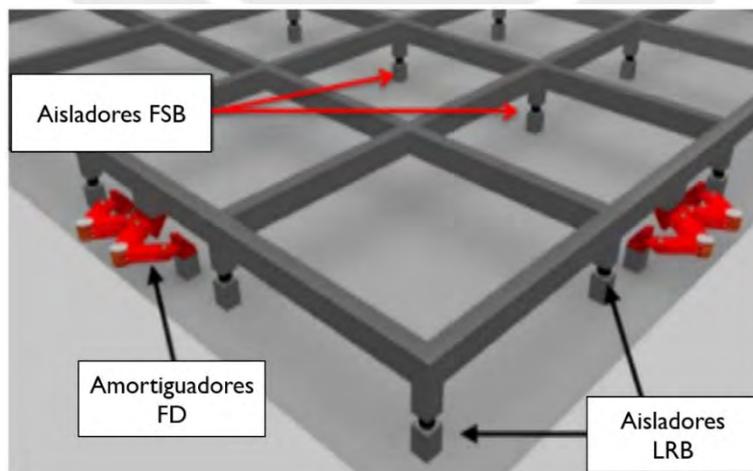


Figura 2.24 Los amortiguadores de fricción de rotación en la base del edificio
Tomado de (Barmo et al, 2014)

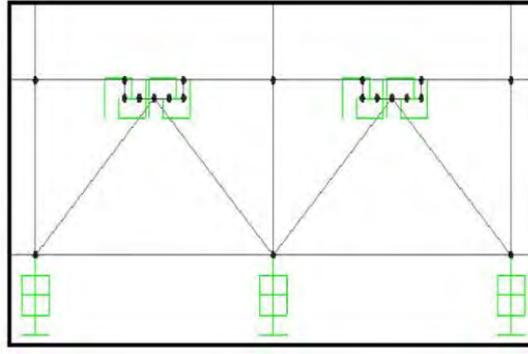


Figura 2.25 Los amortiguadores de fricción de rotación en el nivel de la planta baja
Tomado de (Barmo et al, 2014)

En primera instancia el estudio presenta resultados del análisis en una estructura de 8 pisos. La **Figura 2.26** detalla los desplazamientos por nivel y la **Figura 2.27** indica las derivas para una estructura de 8 pisos con diferentes sistemas de protección sísmica.

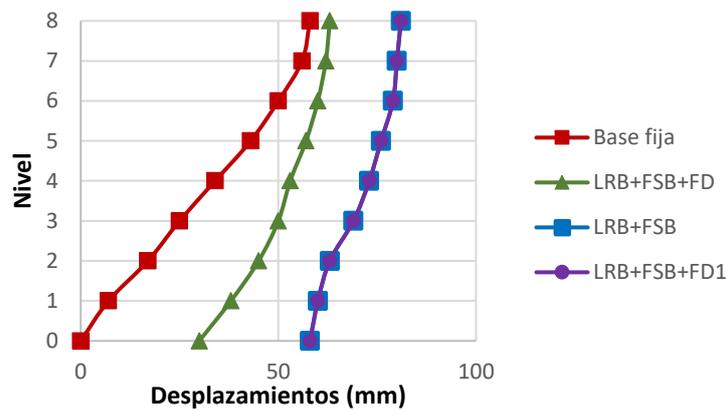


Figura 2.26 Desplazamientos por niveles para una estructura de 8 pisos
Adaptado de (Barmo et al, 2014)

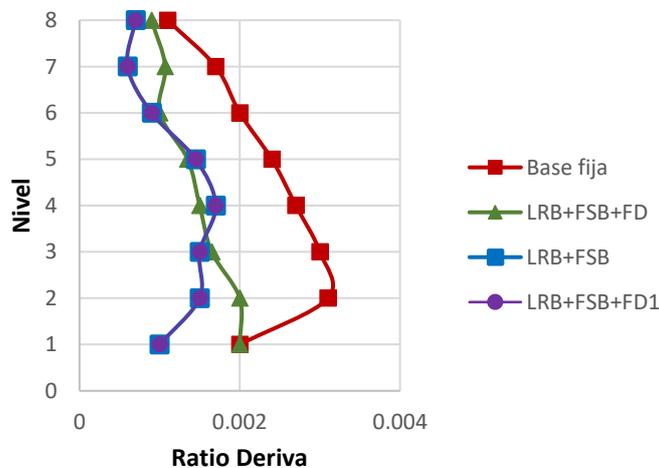
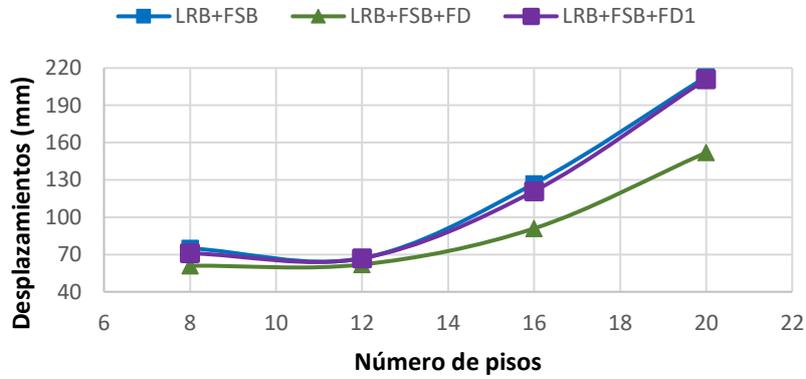
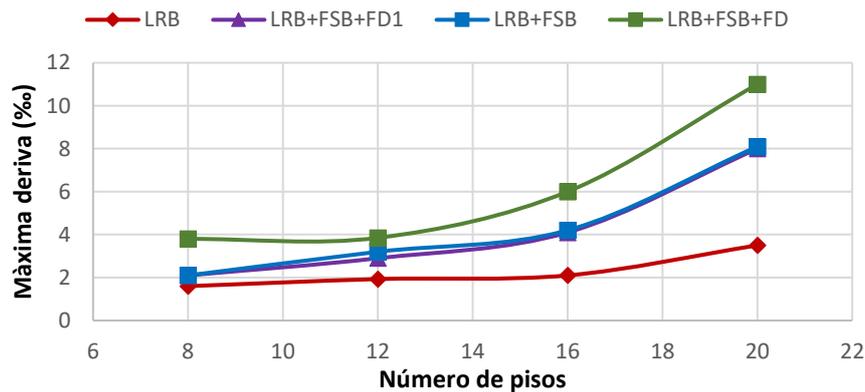


Figura 2.27 Ratio de derivas para una estructura de 8 pisos
Adaptado de (Barmo et al, 2014)

A estos resultados se adicionan valores de análisis para estructuras de 12, 16 y 20 pisos. En la **Figura 2.28** y **Figura 2.29** presentan resultados de desplazamientos y derivas respectivamente al aumentar la altura para los diferentes casos de aislación.



*Figura 2.28 Desplazamientos al aumentar la altura de la estructura
Adaptado de (Barmo et al, 2014)*



*Figura 2.29 Derivas al aumentar la altura de la estructura
Adaptado de (Barmo et al, 2014)*

La **Tabla 2.1** muestra la compilación de resultados, entre los más importantes es el porcentaje de reducción de desplazamientos y el incremento de derivas. El uso del sistema (LRB, FSB, FD) tiene un impacto en términos de reducción de desplazamientos, pero ha tenido un impacto negativo en cuanto a la deriva.

El uso del sistema (LRB, FSB, FD1) no es efectivo y no conduce a una mejora respecto al sistema aislado (LRB, FSB). Este análisis es importante para considerar en el presente proyecto la adición de los FVDs en la base de la estructura. Se prevé que el comportamiento, resumido en la **Tabla 2.1**, pueda reproducirse en el análisis de las estructuras del presente proyecto.

Tabla 2.1 Efectos en desplazamientos y derivas al adicionar los amortiguadores

Número de pisos	(LRB, FSB)	(LRB, FSB, FD)	(LRB, FSB, FD1)	Reducción de desplazamientos (LRB, FSB, FD)	Reducción de desplazamientos (LRB, FSB, FD1)	Efecto de las derivas (LRB, FSB, FD)	Efecto de las derivas (LRB, FSB, FD1)
	Max, Min (mm)	Max, Min (mm)	Max, Min (mm)	(%)	(%)	(%)	(%)
8	52-75	32-61	53-71	28%	Casi sin cambios	Incremento 48%	Casi sin cambios
12	40-67	25-62	40-67	19%	Casi sin cambios	Incremento 18%	Reducción 13%
16	97-127	30-91	77-121	46%	11%	Incremento 27%	Reducción 8%
20	129-213	39-152	130-211	44%	Casi sin cambios	Incremento 15%	Reducción 15%

(LRB, FSB) : Sistema con aisladores LRB y FSB

(LRB, FSB, FD) : Sistema con aisladores con adición de amortiguador en la base

(LRB, FSB, FD1) : Sistema con aisladores con adición de amortiguador en el primer nivel

Adaptado de (Barmo et al, 2014)

2.4.1.2 Proyectos que presentan el sistema híbrido

El Hospital San Bernardino ubicado en Estados Unidos presenta la combinación de aisladores elastoméricos y amortiguadores viscosos (Archer, Young, Ewing, 1996). El *Hayward City Hall* presenta la combinación de aisladores de péndulo de fricción con amortiguadores viscosos.

En el edificio *Kaiser Coronado Data Center* se adicionan los amortiguadores al sistema de aislamiento previamente construido. El templo Concepción en Chile en el cual se implementaron aisladores sísmicos y amortiguadores de fluido viscoso en la base para reducir desplazamientos laterales.

Respecto a estudios teóricos Kelly (1996), menciona las siguientes conclusiones: para sismos con aceleraciones de amplitudes grandes en periodos de corta duración el sistema híbrido es beneficioso, en cambio para sismos moderados la implementación puede ser perjudicial para el desempeño.

Providakis (2007), establece en su estudio que la efectividad del sistema que presenta adición de amortiguadores de fluido viscoso en la base aislada depende de las características del sismo. Es perjudicial e ineficiente para sismos falla lejana, pero es efectiva para sismos de falla cercana.

Barmo (2014), analiza el comportamiento de estructuras aisladas con diferentes niveles de pisos con la adición de disipadores. Menciona la variación de la respuesta estructural de estas combinaciones refiriéndose al aumento en derivas y aceleraciones.

Taboada (2018), estudia la respuesta estructural de una edificación de 5 pisos, ubicado en zona sísmica 4 y suelo tipo S3, con aisladores LRB y amortiguadores viscosos complementarios en su base.

CAPÍTULO III: PARÁMETROS DE SELECCIÓN

La definición de parámetros en las propiedades de los elementos, criterios base en la conformación de los sistemas de estudio y la elección de los procesos de análisis serán detallados en el presente capítulo.

3.1 Requisitos generales de diseño

Se detallarán los requisitos considerados para los elementos del sistema híbrido.

3.1.1 Referido al sistema de aislamiento – ASCE 7-16

En cuanto a condiciones ambientales: Se debe prever en el sistema de aislamiento diversas condiciones ambientales; así mismo, para los efectos de la fatiga, la fluencia y el envejecimiento.

En cuanto a la Fuerza de restauración lateral: La fuerza lateral correspondiente al máximo desplazamiento debe ser por lo menos mayor en el 25% del peso sísmico a la fuerza generada al 50% de ese desplazamiento. Esta condición también debe considerarse para los límites superior e inferior.

En cuanto a restricciones de desplazamiento: No se deben considerar restricciones menores al desplazamiento máximo total (D_{TM}), obtenido por el terremoto considerado de máximo riesgo (MCE_R). A menos que se tengan las siguientes consideraciones de acuerdo con los requisitos de análisis dinámico y estática descritos:

- *La estructura sobre el sistema de aislamiento se verifica para determinar la estabilidad y la demanda de ductilidad de la respuesta MCE_R .*
- *Considerando explícitamente las características no lineales del sistema de aislamiento y la superestructura. La restricción de desplazamiento no se hace efectiva con un desplazamiento inferior a $0.6 D_{TM}$ (ASCE/SEI, 2016).*

En cuanto a la carga vertical: Todos los elementos deben diseñarse a fin brindar estabilidad para cargas de diseño verticales, sometidos al D_{TM} . Las cargas verticales máximas y mínimas para los aisladores serán obtenidas de acuerdo al inciso **3.1.4**.

En cuanto a la volcadura: El factor de seguridad para prevenir este parámetro al menos 1 para combinaciones de carga requeridas. Todas las condiciones de gravedad se deben estudiar.

Inspección y reemplazo: Debe realizarse en las estructuras que atraviesen la interfaz de aislamiento. Su acceso debe ser proporcionado en todos los elementos del sistema.

Estos controles aseguran el movimiento libre y sin obstáculos de la estructura al más alto nivel de diseño. Está a cargo de un programa de reparación y monitoreo.

3.1.2 Referido al sistema de disipación

En este sistema solo se contempla la adición de los FVDs en la interfaz de aislamiento. Se mencionarán las consideraciones respecto a las especificaciones de la norma ASCE 7-16 y al *Damper Design Manual (Taylor Devices, 2020)*

En cuanto al diseño del amortiguador: La ubicación en la base del sistema aislado no implica alguna variación en las propiedades de estos amortiguadores. Sigue el mismo principio de definir el valor de la constante de amortiguamiento mediante el análisis conjunto con el sistema aislado.

En cuanto al brazo rígido: Se debe proporcionar una adecuada conexión de los brazos rígidos hacia la interfaz de aislamiento y proveer un adecuado diseño a fin de no obtener resultados, respecto a los amortiguadores, muy diferentes al comportamiento en la realidad.

En cuanto a la inspección y pruebas: Se deberá establecer un programa de inspección y pruebas apropiado para cada elemento, para garantizar que respondan de satisfactoriamente a lo largo de su vida útil de diseño.

En cuanto a calidad: “Se debe establecer un plan de control de calidad para la fabricación de dispositivos, debe incluir como mínimo los requisitos de prueba” (ASCE/SEI, 2016). Antes de la instalación en un edificio, deben ser probados para asegurar que sus características de fuerza-desplazamiento estén dentro de los límites establecidos.

3.1.3 Referido al sistema estructural

Las superestructuras, empleadas en los diversos sistemas de protección, deben estar en el rango de los parámetros recomendados en esta sección. Se mencionarán las restricciones que debe presentar la edificación.

La altura estructural por encima de la interfaz del sistema híbrido medido desde la base debe ser menor o igual a 20 metros. La estructura que se encuentra debajo de este sistema tendrá restricciones por los contornos del suelo y su movimiento será del mismo, por ello, no importa la altura que tenga.

La relación altura estructural y la base menor no debe exceder un factor de 1.5 a fin de evitar el volteo (restricción inicial sujeto a comentarios luego del análisis de resultados). Las restricciones respecto a irregularidades se dan de acuerdo al uso de la edificación. La **Tabla 3.1** detalla lo descrito:

Tabla 3.1 Restricción de irregularidades en la estructura

Zona sísmica (Z)	Categoría de Uso	Restricciones
4 y 3	A y B	Irregularidades extremas no permitidas
2 y 1	A y B	Sin restricciones
4	C	Irregularidades extremas no permitidas
1, 2 y 3	C	Sin restricciones

Adaptado de Norma Técnica E.030

Distribución horizontal de la fuerza: No se debe presentar discontinuidad respecto a los diafragmas en la superestructura debe proporcionar continuidad. “La resistencia y ductilidad deben ser adecuadas para transmitir fuerzas de una parte de la estructura a otra” (ASCE/SEI, 2016).

Juntas entre edificios: No deberán ser inferiores al D_{TM} en el sistema aislado y la reducción resultante de este valor en el sistema híbrido.

Componentes sobre la interfaz de los sistemas: La fuerza lateral sísmica utilizada en el diseño de los elementos estructurales y no estructurales en la superestructura, debe ser igual a la respuesta dinámica máxima para cada sistema analizado

3.1.4 Combinaciones de cargas verticales en aisladores – Norma E.031

Las cargas sobre los aisladores se calculan aplicando cargas sísmicas horizontales debidas al MCE_R , las diversas conjugaciones de carga se presentan a continuación:

Carga vertical promedio:

$$P_{prom} = 1.0 CM + 0.5 CV \quad (16)$$

Carga vertical máxima:

$$P_{m\acute{a}x} = 1.25 (CM + CV) + 1.0 (CSH + CSV) \quad (17)$$

Carga vertical mínima:

$$P_{m\acute{i}n} = 0.9 CM - 1.0 (CSH + CSV) \quad (18)$$

Donde CV , CM , CSH y CSV se refieren a la carga viva, muerta, de sismo horizontal y vertical respectivamente.

3.1.5 Factores de modificación de propiedades de los aisladores – Norma E 0.31

Con estos factores se obtienen las propiedades máximo y mínimo (λ) para considerar la variación del diseño nominal que “sirven para abordar el impacto de los cambios en la propiedad de los materiales en la respuesta del sistema de aislamiento” (Thompson, Whittaker, Fenves, Mahin, 2015). Como lo son los “efectos de envejecimiento, velocidad de carga, temperatura, variabilidad en la fabricación, contaminación y temperatura” (ASCE/SEI, 2016).

El factor máximo ($\lambda_{m\acute{a}x}$) y mínimo ($\lambda_{m\acute{i}n}$) de modificación de propiedades estan especificados en la **Tabla 3.2 - Tabla 3.3** y obtenidos por las ecuaciones (19) - (20):

Tabla 3.2 Factores de modificación máximos y mínimos de propiedades - Dispositivos Clase I

	Interfaz sin lubricación	Interfaz lubricada	LRD	LRB	LRB	HDRB	HDRB
Variable	μ o Qd	μ o Qd	K	Kd	Qd	Kd	Qd
Mínimo factor de modificación $\lambda_{m\acute{a}x}$	1.6	2.3	1.3	1.3	1.5	2.0	1.7
Máximo factor de modificación $\lambda_{m\acute{i}n}$	0.5	0.5	0.8	0.5	0.5	0.8	0.8

Tomado de Norma Técnica E.031

Tabla 3.3 Factores de modificación máximos y mínimos de propiedades - Dispositivos Clase II

	Interfaz sin lubricación	Interfaz lubricada	LRD	LRB	LRB	HDRB	HDRB
Variable	μ o Qd	μ o Qd	K	Kd	Qd	Kd	Qd
Mínimo factor de modificación $\lambda_{m\acute{a}x}$	2.1	3.2	1.8	1.8	1.8	2.2	1.8
Máximo factor de modificación $\lambda_{m\acute{i}n}$	0.6	0.6	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8

Tomado de Norma Técnica E.031

$$\lambda_{m\acute{a}x} = \left(1 + \left(0.75 * (\lambda_{(ae,m\acute{a}x)} - 1) \right) \right) * \lambda_{(tvs,m\acute{a}x)} * \lambda_{(fab,m\acute{a}x)} \quad (19)$$

$$\lambda_{\text{mín}} = \left(1 + \left(0.75 * (\lambda_{(ae,\text{mín})} - 1)\right)\right) * \lambda_{(tvs,\text{mín})} * \lambda_{(fab,\text{mín})} \quad (20)$$

Donde $\lambda_{(ae,\text{máx})}$ es utilizado para determinar el máximo valor considerando condiciones ambientales y de envejecimiento, $\lambda_{(ae,\text{mín})}$ para determinar el valor mínimo considerando las condiciones previas.

$\lambda_{(tvs,\text{máx})}$ es el factor de modificación para determinar el máximo valor considerando condiciones de temperatura, velocidad de carga y scragging; $\lambda_{(tvs,\text{mín})}$ es el factor de modificación para determinar el valor mínimo considerando las condiciones previas.

$\lambda_{(fab,\text{máx})}$ es el factor de modificación para determinar el máximo valor considerando la variabilidad en la fabricación de aisladores y $\lambda_{(fab,\text{mín})}$ es el factor de modificación para determinar el valor mínimo considerando las condiciones previas. (Norma Técnica E.031)

3.2 Análisis para el sistema aislado

Los sistemas de aislado será estudiando con los siguientes métodos: análisis estático, combinación modal espectral y tiempo historia.

3.2.1 Análisis estático o de fuerzas laterales equivalentes

Representa los efectos de movimiento del suelo mediante fuerzas estáticas equivalentes. El peso sísmico de la estructura afectado por el cociente sísmico, calculado a partir del espectro de respuesta, nos da como resultado la sumatoria de todas las fuerzas equivalentes. Su distribución depende del peso de cada piso y su altura. Se elaboró la **Figura 3.1** para representar las fuerzas laterales distribuidas en la estructura.

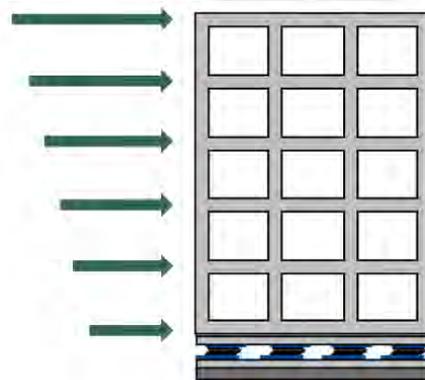


Figura 3.1 Fuerzas laterales distribuidas en cada nivel del edificio

“Se incorporan valores dependientes de la amortiguación y la rigidez efectiva, a fin de considerar implícitamente las propiedades no lineales del sistema de aislamiento” (FEMA P-751, 2012). Estos parámetros son utilizados también en análisis modal y/o tiempo historia.

Para el diseño mediante este análisis, la edificación se debe ubicar en las zonas sísmicas 1 o 2. En caso se encuentre en la zona 3 debe encontrarse en tipos de suelo S1 o S2, y si están en la zona 4 debe estar en un suelo tipo S1.

3.2.2 Análisis dinámico modal espectral

Detérmina la máxima respuesta estructural utilizando los modos de vibración de la estructura y el espectro de pseudo-aceleraciones como carga sísmica. Existen diversos métodos para la combinación de resultados modales, “ya que las respuestas espectrales máximas en cada modo ocurren en instantes diferentes” (Computers and Structures, 2015). Los diferentes métodos son los siguientes:

- Método de suma de los valores absolutos: Realiza la acción denominada en su nombre en las máximas respuestas de cada modo de vibración. Es considerado el método más conservador.
- Método SRSS (*Square Root of the Sum of the Squares*): Se asume que todos los modos son independientes. “Tiene buena precisión cuando las frecuencias modales están bien separadas. Sin embargo, cuando las frecuencias de los son muy próximas entre sí este método dará malos resultados” (Zhou, Yu y Dong, 2004).
- Método CQC (*Complete Quadratic Combination*): Es un método más preciso que involucra la “asociación estadística entre frecuencias modales y relaciones de amortiguamiento de la estructura” (Wilson, Kiureghian y Bayo, 1981).

3.2.3 Análisis no lineal Tiempo - Historia

Mediante este análisis se simula la forma del movimiento sísmico, los desplazamientos y la fuerza totales son más consistentes con el terremoto real. Esto significa que el análisis tiene “en cuenta los cambios en la rigidez de la estructura durante ese evento” (FEMA P-751, 2012).

“Los desplazamiento, fuerzas actuantes y aceleraciones se muestran como funciones de tiempo, la estructura se resuelve para intervalos cortos de tiempo” (Computers and Structures, 2015). Los registros de aceleración a utilizar deben ser adecuadamente procesados y deben ser característicos del sitio de estudio.

3.3 Análisis para el sistema híbrido

Se realizará el análisis no lineal Tiempo-Historia para la presentación de resultados del sistema híbrido. Debido a que realiza el análisis para intervalos cortos de tiempo es necesario para el funcionamiento, en el modelo, de los amortiguadores de fluido viscoso y evaluación del comportamiento histerético de los aisladores. El diseño del sistema aislado si involucra todos los métodos de análisis mencionados previamente.

3.3.1 Espectro definido

La formación del espectro será realizada con el procedimiento de las especificaciones de las Normas Técnicas E.030 y E.031. La **Tabla 3.4** muestra factor de zona Z correspondiente a la ubicación de la estructura, es el factor de sismo considerado para diseñar la estructura que se encuentra por encima del sistema.

Tabla 3.4 Factor de Zona

Zona	Z(g)
4	0.45
3	0.35
2	0.25
1	1

Tomado de Norma Técnica E.030

La **Tabla 3.5** detalla el valor del factor de suelo S_i .

Tabla 3.5 Factor Suelo "S"

FACTOR SUELO "S"				
	S0	S1	S2	S3
Z4	0.80	1.00	1.05	1.10
Z3	0.80	1.00	1.15	1.20
Z2	0.80	1.00	1.20	1.40
Z1	0.80	1.00	1.60	2.00

Tomado de Norma Técnica E.030

El parámetro T es el periodo fundamental de la estructura. C es el factor de amplificación sísmica, no debe ser mayor a 2.5, depende del valor del periodo. T_p es el periodo que define la plataforma del factor C .

Tabla 3.6 Periodos " T_p " y " T_L "

	Perfil del suelo			
	S0	S1	S2	S3
T_p (s)	0.30	0.40	0.60	1.00
T_L (s)	3.00	2.50	2.00	1.60

Tomado de Norma Técnica E.030

$$T < 0.2 T_p \quad C = 1 + 7.5 \frac{T}{T_p} \quad (213)$$

$$0.2 T_p < T < T_p \quad C = 2.5 \quad (22)$$

$$T_p < T < T_L \quad C = 2.5 * \left(\frac{T_p}{T}\right) \quad (23)$$

$$T > T_L \quad C = 2.5 * \left(\frac{T_p \cdot T_L}{T}\right) \quad (24)$$

U es un factor de uso o importancia según la categoría del edificio. Para el sistema de aislación este será 1, se puede considerar un valor mayor en el diseño de la superestructura. R es el factor de reducción que depende del tipo de estructura.

No se debe utilizar un factor de reducción superior a 2 para las superestructuras, ya que se trata de estructuras aisladas que se mantienen en el rango elástico antes del terremoto de diseño. El espectro se calcula con la siguiente ecuación:

$$S_a M = 1.5 Z U C S \quad (25)$$

Se elaboró la **Tabla 3.7** que contiene los valores que se usarán:

Tabla 3.7 Valores para la construcción del Espectro

Z (g)	0.45
U	1.00
S	1.00
T _p (s)	0.40
T _L (s)	2.50

3.4.2 Registros de señales a utilizar

Para representar “el movimiento del suelo se requiere de un mínimo de siete pares de registros de aceleración” (ASCE/SEI, 2016). Se elaboró la **Tabla 3.8** para presentar los datos de los registros sísmicos y sus respectivas etiquetas con las que se identificarán en la presentación de resultados.

Tabla 3.8 Descripción de las señales escogidas

Señal	Talca 2010	Tacopilla 2007	Mejillón 2007	Lima 1974	Lima 1970	Lima 1966	Cuya 2005
Etiqueta	R. Sísmico 1	R. Sísmico 2	R. Sísmico 3	R. Sísmico 4	R. Sísmico 5	R. Sísmico 6	R. Sísmico 7
dt (s)	0.005	0.005	0.005	0.02	0.02	0.02	0.005
Duración (s)	148	115	112	98	45	66	75
Nro. Datos	29600	23000	22399	4899	2249	3283	14999

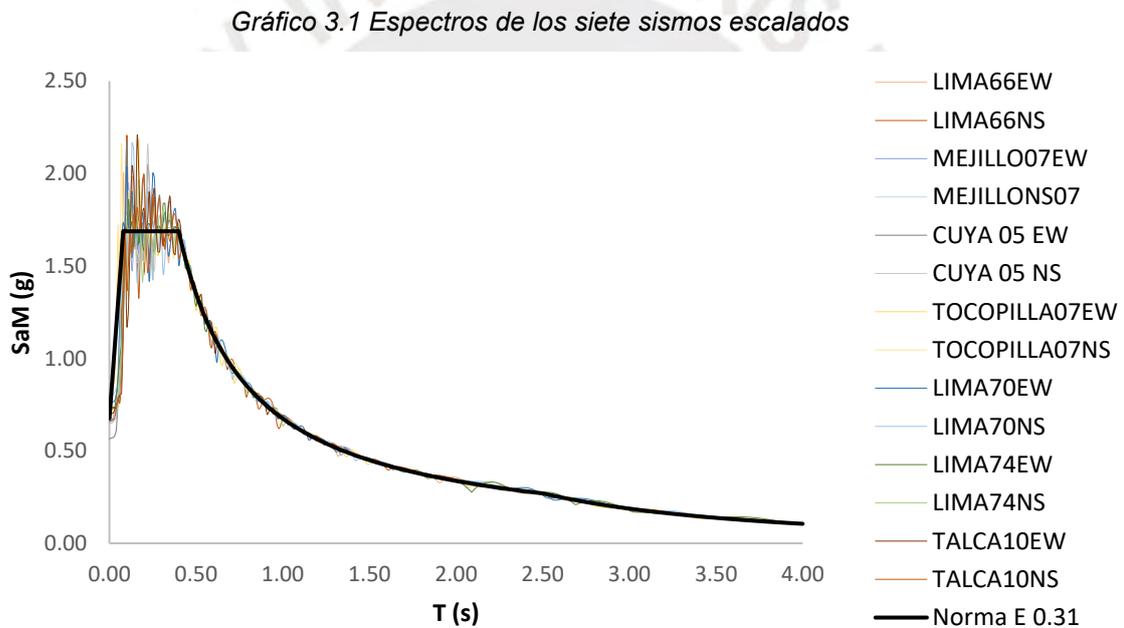
Se debe cumplir la Ec. (26) siendo $S_{a prom}$ la ordenada del espectro que se obtiene al promediar los espectros de cada registro.

$$S_{aprom} \geq S_aM \quad (26)$$

Se utilizó el programa *SeismoSignal* para la corrección por línea base y el filtrado de frecuencias en cada componente de los registros. Para obtener señales espectro-compatibles se utilizó el programa *SeismoMatch*.

En las señales espectro compatibles el periodo que abarca este escalamiento es entre $0.2T_M$, el periodo determinado por propiedades del límite superior, y $1.25T_M$, con el periodo determinado por propiedades del límite inferior. Donde el espectro de respuesta en la dirección de análisis no sea menor que el 90% del espectro de diseño.

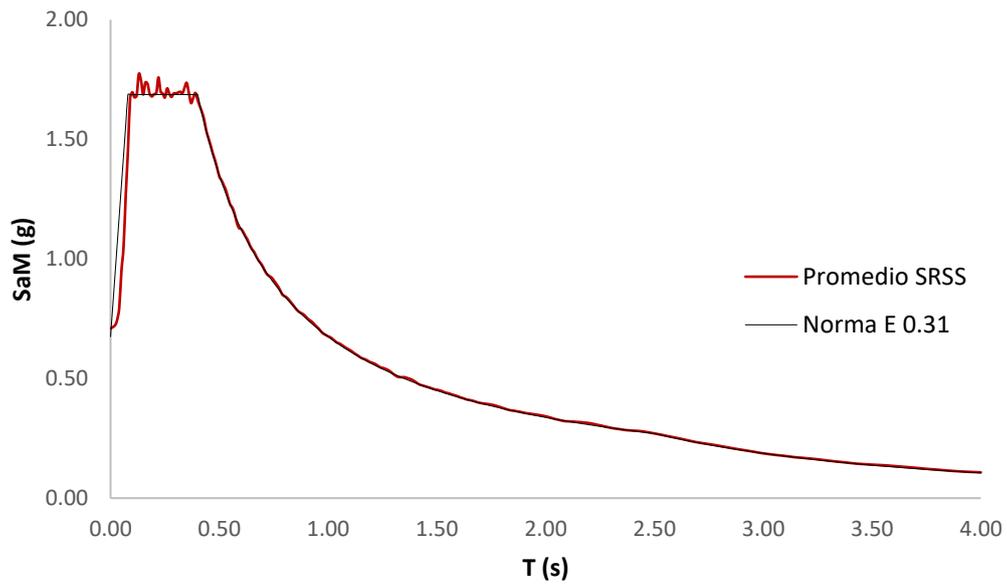
El autor elaboró el **Gráfico 3.1** para mostrar los espectros de los sismos escalados en comparación con el espectro de definido por la Norma Técnica E 0.31.



Cada par de registros escalados construye un espectro de pseudo-aceleraciones mediante la combinación por el método *SRSS*. El promedio del total de registros debe cumplir con “no ser menor al espectro de diseño en el rango de periodos entre $0.75T_M$, el periodo determinado por propiedades del límite superior, y $1.25T_M$, con el periodo determinado por propiedades del límite inferior” (ASCE/SEI, 2016).

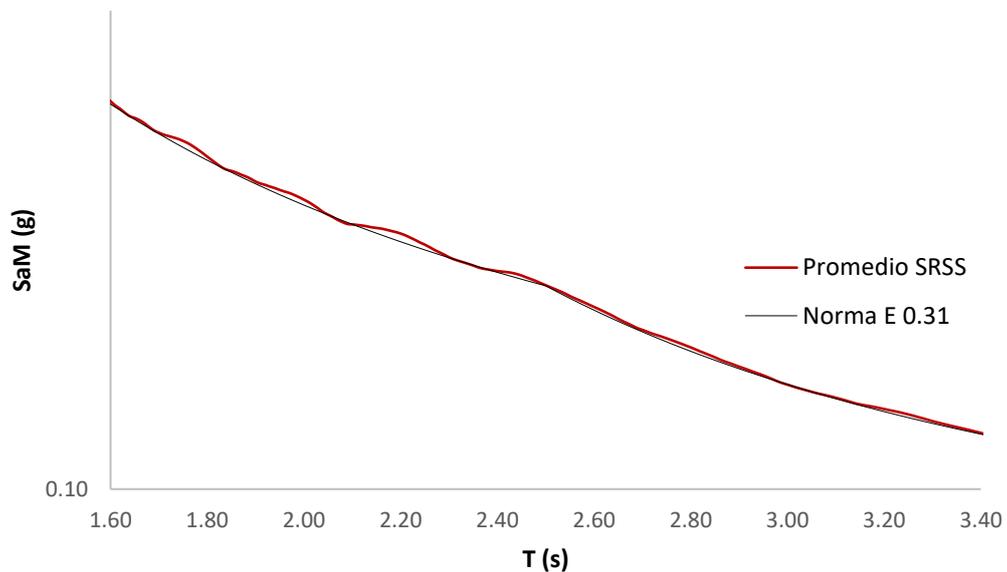
Para el modelamiento en *ETABS 2018*, cada *Load Case* que contenga pares de registros sísmicos contendrá factores de escala de 90% y 44% para que la acción de esos dos componentes. Se elaboró el **Gráfico 3.2** que detalla el espectro promedio obtenido con la combinación *SRSS* en comparación con el espectro definido previamente.

Gráfico 3.2 Comparación Espectro promedio SRSS con el Espectro de la Norma E 0.31



Como se mencionó previamente el espectro promedio SRSS para un intervalo de periodos debe ser mayor o igual que el definido por la norma. Los periodos a utilizar referidos al límite superior e inferior están mencionados en el inciso 5.3.4. Se elaboró el **Gráfico 3.3** para mostrar el intervalo donde se puede identificar que el espectro promedio SRSS no es menor que el definido por la norma.

Gráfico 3.3 Zona de verificación del Espectro promedio SRSS $0.75T_M - 1.25T_M$



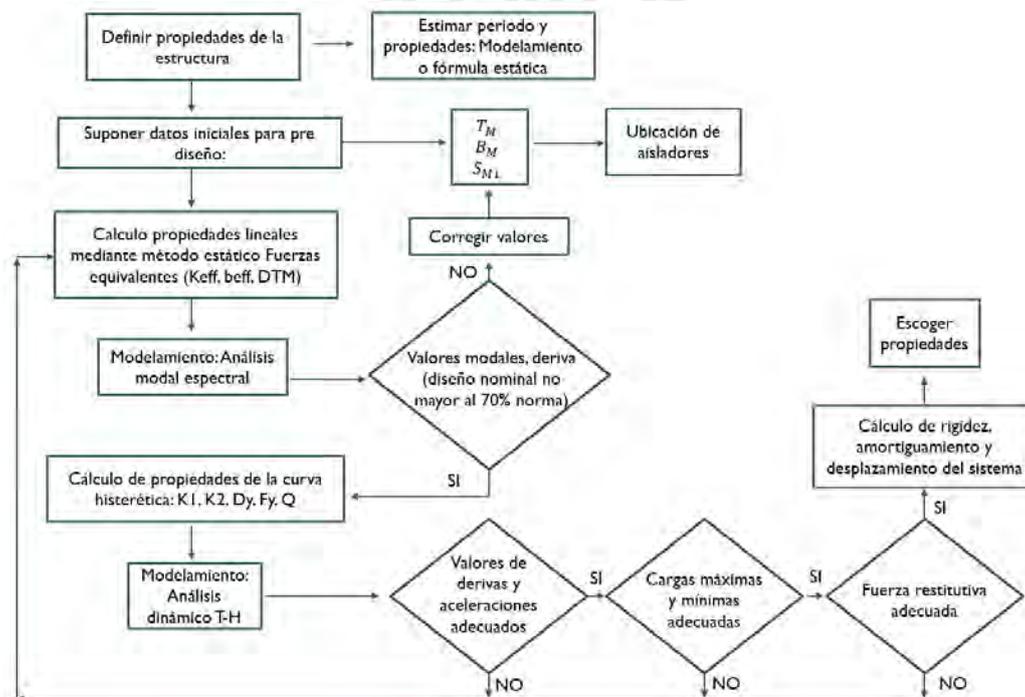
CAPÍTULO IV: CRITERIOS DE DISEÑO PARA EL SISTEMA HÍBRIDO

Se abordará la metodología de diseño que se consideró en el proyecto para definir las propiedades de los aisladores elastoméricos de núcleo de plomo (LRB) y los amortiguadores de fluido viscoso (FVDs).

4.1 Parámetros de diseño de sistema aislado con aisladores LRB

Este diseño implica el cálculo de las propiedades, lineales y no lineales, del sistema de aislamiento y sus dispositivos. Se elaboró el **Gráfico 4.1** para simplificar la metodología de diseño.

Gráfico 4.1 Diagrama de flujo para diseño de aisladores sísmicos



Como se aprecia en el **Gráfico 4.1** se sigue un proceso iterativo. El cálculo parte de definir propiedades lineales de los aisladores, mediante consideraciones iniciales que luego serán corregidas hasta encontrar valores adecuados para la estructura, hasta establecer las propiedades no lineales que satisfagan cada ciclo iterativo.

Mediante el análisis estático correspondiente inciso **4.1.1**, se obtienen parámetros iniciales para establecer las propiedades lineales de los aisladores, los cuales nos permiten realizar la primera iteración mediante un análisis modal espectral donde se verifican: derivas, aceleraciones, desplazamientos, amortiguación y periodo. Se partirá

con el diseño nominal; por ello, la verificación de derivas debe considerar no superar el 70% de los valores límites.

Ya definidos los valores lineales se procede a calcular las propiedades no lineales del modelo bilineal con las ecuaciones descritas en el inciso **2.1.1.3**. Estas propiedades nos permiten realizar la segunda etapa de iteración que involucra un análisis dinámico de Tiempo-Historia. El proceso finaliza cuando las propiedades de los aisladores hacen que el sistema de aislamiento cumpla con los desplazamientos, periodos, derivas, aceleraciones, rigidez, amortiguación y fuerzas restitutivas.

4.1.1 Procedimiento estático o de fuerzas equivalentes

En el análisis estático solo se considerará los desplazamientos laterales mínimos y no los requerimientos de fuerzas laterales mínimas para el diseño estructural. Dado que no se realizará el diseño de la superestructura o la subestructura, solo se abarca el de los dispositivos.

4.1.1.1 Desplazamientos laterales mínimos – ASCE 7-16

Desplazamiento máximo (D_M): Representa a los desplazamientos máximos “en el centro de masa del edificio sin el desplazamiento adicional debido a la excentricidad de masa real o accidental” (*FEMA P-750, 2009*). Se obtiene de la siguiente manera:

$$D_M = \frac{g S_{M1} T_M}{4\pi^2 B_M} \quad (27)$$

S_{M1} es el valor de sismo máximo considerado (MCE_R) de 5% de amortiguación espectral, g es la aceleración debida a la gravedad, T_M es el periodo efectivo de la estructura aislada sísmicamente al D_M en la dirección considerada. B_M es el coeficiente numérico relacionado con la amortiguación efectiva del sistema de aislamiento β_M , indicado en la **Tabla 4.1**.

Tabla 4.1 Relación amortiguamiento efectivo con factor B_M

Amortiguamiento efectivo β_M	Factor B_M
≤ 2	0.80
5	1.00
10	1.20
15	1.35
20	1.50
30	1.70
40	1.90
≥ 50	2.00

Adaptado de (ASCE-SEI, 2016)

Período de Efectivo (T_M): Se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$T_M = 2\pi \sqrt{\frac{W}{k_M g}} \quad (28)$$

K_M es la rigidez efectiva del sistema de aislamiento al D_M

Desplazamiento total (D_{TM}): Las ecuaciones para determinar el D_{TM} incluyen los desplazamiento adicionales debido a la torsión. Parte de la hipótesis de que “la masa del edificio y la rigidez de aislamiento tienen una distribución similar en el plano” (FEMA P-751, 2012). Debe ser mayor a los prescrito por las ecuaciones (29) y (30):

$$D_{TM} = D_M \left[1 + \left(\frac{y}{P_T} \right)^2 \frac{12e}{b^2 + d^2} \right] \quad (29)$$

$$D_{TM} > 1.15 D_M \quad (30)$$

La distancia entre los centros de rigidez del sistema de aislamiento y el elemento de interés, medido perpendicularmente a la dirección de la carga sísmica considerada es “y”. La excentricidad real medida en planta entre el centro de masa de la superestructura y el centro de rigidez del sistema de aislamiento es “e”. La dimensión de planta más larga de la estructura es “d” y la dimensión más corta perpendicular a esta es “b”.

P_T es la relación del período de traslación y de torsión efectivo del sistema de aislamiento. Se obtiene con la expresión definida en la ecuación (31)

$$P_T = \frac{1}{r_i} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i^2 + y_i^2)}{N}} \quad (31)$$

x_i, y_i son las distancias horizontales desde el centro de masa a la i-ésima unidad de aislamiento. N , el número de aisladores.

El radio de giro del sistema de aislamiento, r_i , se calcula con (32)

$$r_i = \sqrt{\frac{b^2 + d^2}{12}} \quad (32)$$

La **Figura 4.1** ilustra el desplazamiento máximo (D_M) en el centro de masa del edificio y el desplazamiento máximo total (D_{TM}) en las esquinas de un edificio aislado. La **Figura 4.2** involucra los valores necesario para el cálculo del D_{TM} .

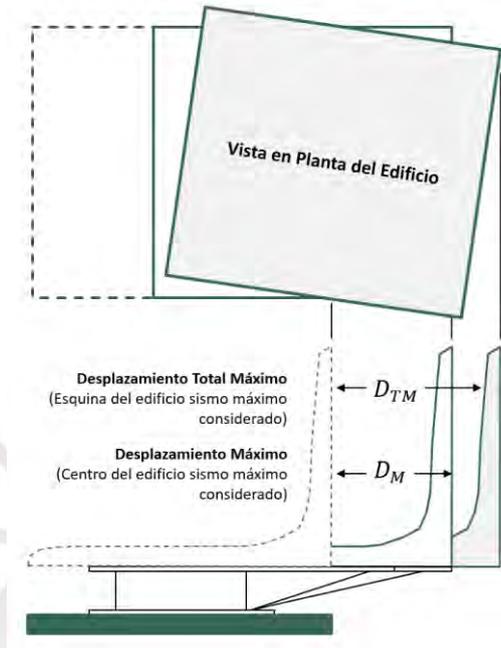


Figura 4.1 Esquema de desplazamiento D_M y D_{TM}
Adaptado de (FEMA P-751, 2012)

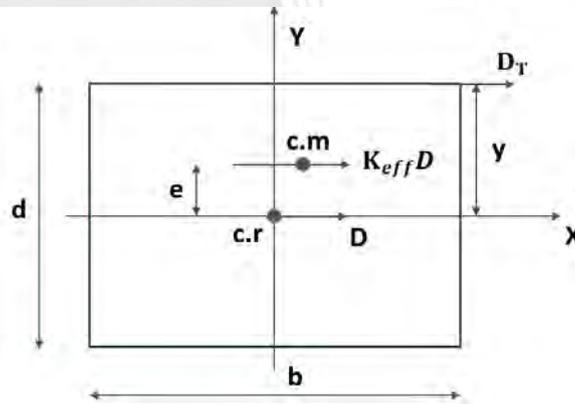


Figura 4.2 Valores de la Ec. (33) distribuidos en planta para el cálculo de D_{TM}
Adaptado de (Naeim, Kelly, 1999)

4.2 Diseño de los amortiguadores de fluido viscoso (FVDs)

El diseño de amortiguadores de fluido viscosos ubicados en la interfaz de aislamiento en un edificio aislado no tiene una metodología definida a diferencia de las distribuciones convencionales, en diagonal o tipo Chevron. El presente proyecto propone utilizar la metodología de eficiencia (E), el procedimiento de la misma se detallará más adelante.

4.2.1 Parámetros de diseño

En estos dispositivos la fuerza con que responde el amortiguador está dada por una relación entre los tres siguientes componentes: la velocidad (V), el valor del exponente de velocidad (α) y la constante de amortiguamiento (C).

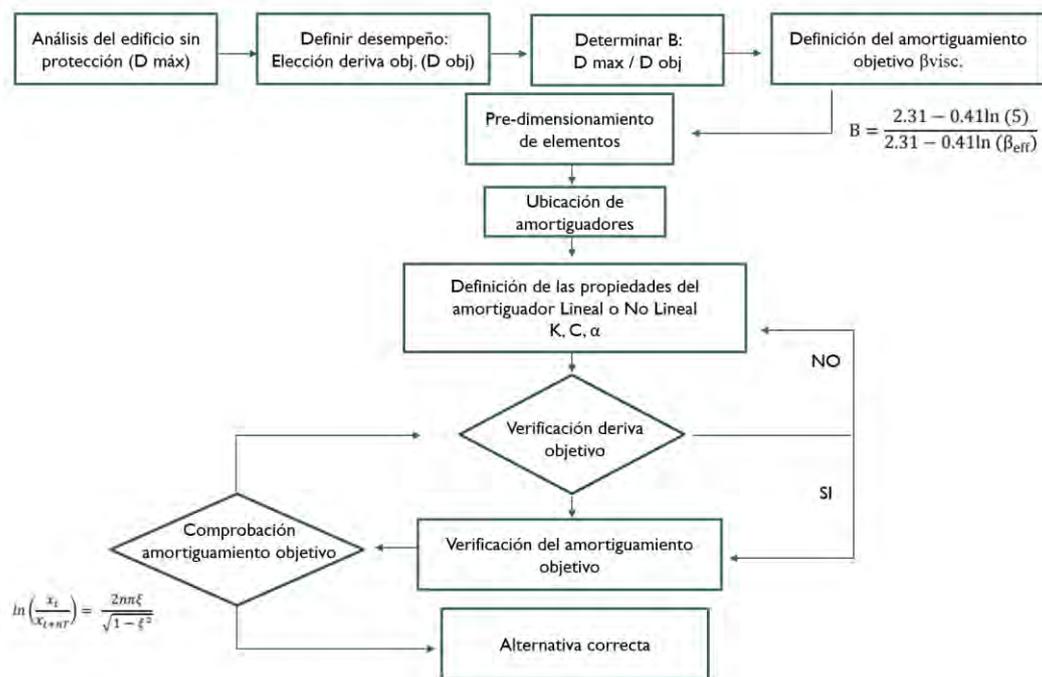
En la siguiente ecuación se detalla la fuerza del disipador:

$$F = CV^\alpha \quad (33)$$

Se elaboró el **Gráfico 4.2** para esquematizar un esquema de diseño de los FVDs para distribuciones convencionales. El principio es tener como respuesta estructural una deriva y amortiguamiento objetivo mediante la aplicación de estos amortiguadores.

A semejanza del diseño de los aisladores, también es un proceso iterativo que implica correcciones donde se busca encontrar el valor de “ C ” que cumpla los parámetros objetivos, deriva y amortiguamiento. El valor de exponente de velocidad generalmente es un valor fijo previamente definido no considerado en el proceso iterativo.

Gráfico 4.2 Esquema de diseño de amortiguadores de fluido viscoso



Obtención del Coeficiente de amortiguamiento (C): Este parámetro define la magnitud de la fuerza amortiguadora del dispositivo. Por lo general, si un coeficiente deseado es extremadamente alto, la rigidez de la estructura circundante se convierte en un factor limitante. “Ya que el movimiento relativo en los extremos del amortiguador se vuelve muy pequeño si esta rigidez es demasiado baja para transmitir el movimiento al amortiguador” (Taylor Devices, 2020).

Si un coeficiente deseado es extremadamente pequeño, la cantidad de energía absorbida por el amortiguador también es pequeña y, por lo tanto, el beneficio proporcionado por el amortiguador es limitado.

El cálculo de esta constante para amortiguadores con distribuciones convencionales depende si son lineales o no lineales. Se detallarán las expresiones necesarias para la obtención en cada caso:

Amortiguadores lineales: la obtención de este parámetro en estos amortiguadores se obtiene con siguiente expresión:

$$\beta_{visc.} = \frac{T \sum_j C_j \phi_{rj}^2 \cos^2 \theta_j}{4\pi \sum_i m_i \phi_i^2} \quad (34)$$

Donde:

$\beta_{visc.}$: Amortiguamiento Viscoso Objetivo.

T : Periodo de la estructura

ϕ_i : Modo de vibración del periodo fundamental

ϕ_{rj} : Desplazamiento Relativo del modo de vibración fundamental

θ_j : Ángulo de inclinación del disipador

m_i : Masa de entrepiso

Esta ecuación tiene en cuenta el factor de amortiguación constante para todos los dispositivos. Sin embargo, debido a la importancia de los primeros modos, se han demostrado que los amortiguadores en pisos superiores son menos efectivos que en los niveles inferiores.

Amortiguadores no lineales: La estimación inicial de la constante de amortiguación "C" del dispositivo no lineal se puede calcular mediante la siguiente fórmula:

$$\beta_{visc.} = \frac{\sum_j \lambda C_j \phi_{rj}^{1+\alpha} \cos^{1+\alpha} \theta_j}{2\pi A^{1-\alpha} W^{2-\alpha} \sum_i m_i \phi_i^2} \quad (35)$$

Donde:

λ : Valores tabulados en el FEMA 273 a partir de lo siguiente:

$$\lambda = 2^{2+\alpha} \frac{r^2(1 + \frac{\alpha}{2})}{r(2 + \alpha)} \quad (36)$$

r : Función ganma

A: Amplitud del desplazamiento del modo fundamental de la estructura

w: Frecuencia angular fundamental de la estructura

α : Exponente de velocidad

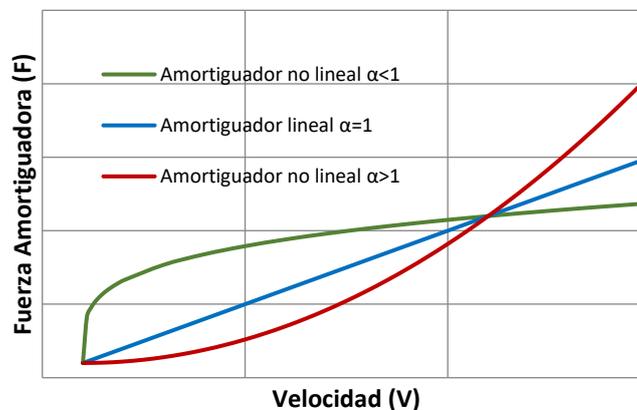
“Los coeficientes disponibles son prácticamente ilimitados” (*Taylor Devices, 2020*). Esto significa que los amortiguadores de fluido viscoso se pueden fabricar con valores muy altos y muy bajos.

Cálculo del Exponente de Velocidad (α): “Describe el comportamiento histerético de los FVDs y define la reacción del dispositivo ante los impactos de velocidad” (*Taylor Devices, 2020*). Normalmente se puede establecer valores entre 0.1 y 2.0 según la aplicación específica.

El amortiguador no lineal presenta un $\alpha < 1.0$. “Estos dispositivos muestran eficiencia para aminorar altos *shocks* de velocidad en comparación con los lineales, reaccionan con mayor fuerza para velocidades relativas bajas” (*Hwang, 2002*). Los valores de α en el “rango de 0.3 a 0.5 son los más comunes para aplicaciones sísmicas en edificios” (*Taylor Devices, 2020*).

En los amortiguadores lineales la fuerza es proporcional a la velocidad relativa ya que presenta un α igual a 1.0. El uso de amortiguadores con $\alpha > 1.0$ no es común “porque se requieren grandes velocidades para incrementar significativamente la fuerza en el amortiguador” (*Hwang, 2002*). El **Gráfico 4.3** se muestra gráficamente todos los comportamientos descritos.

Gráfico 4.3 Relación Fuerza - Velocidad en amortiguadores viscosos

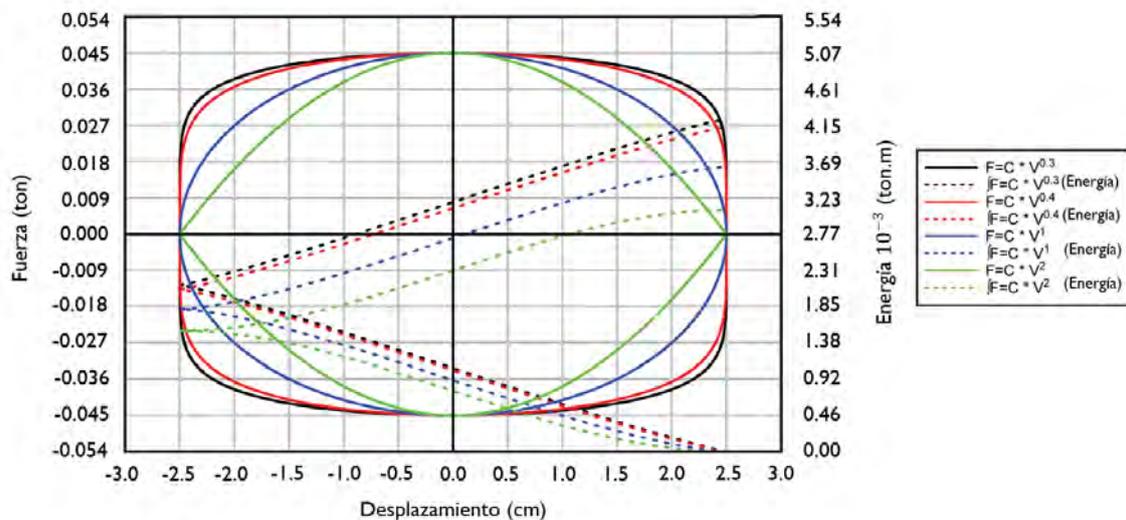


Adaptado de (*Hwang, 2002*)

El **Gráfico 4.4** compara la energía absorbida para diferentes exponentes de velocidad. La curva roja correspondiente al exponente de 0.4 demuestra que la energía bajo la curva de Fuerza vs Desplazamiento (histéresis) es mayor que la curva azul, donde el exponente de amortiguación es 1.0. Sin embargo, si se traza un exponente de amortiguamiento de menos de 0.4 se realiza un punto de rendimientos decrecientes sobre este efecto. Es decir, la diferencia entre la línea 0.4 en rojo y la línea 0.3 en negro es muy pequeña.

Dado que la fuerza de amortiguación está desfasada con las tensiones de deflexión, es importante que este efecto no se vea comprometido por un exponente demasiado bajo. Por lo tanto, un exponente de amortiguación de aproximadamente 0.3 a menudo proporciona una combinación óptima de mantener una gran cantidad de energía absorbida por ciclo y al mismo tiempo minimizar la tensión de los miembros estructurales adyacentes.

*Gráfico 4.4 Comparación de energía absorbida con diferentes exponentes de velocidad
Adaptado de (Taylor Devices, 2020)*



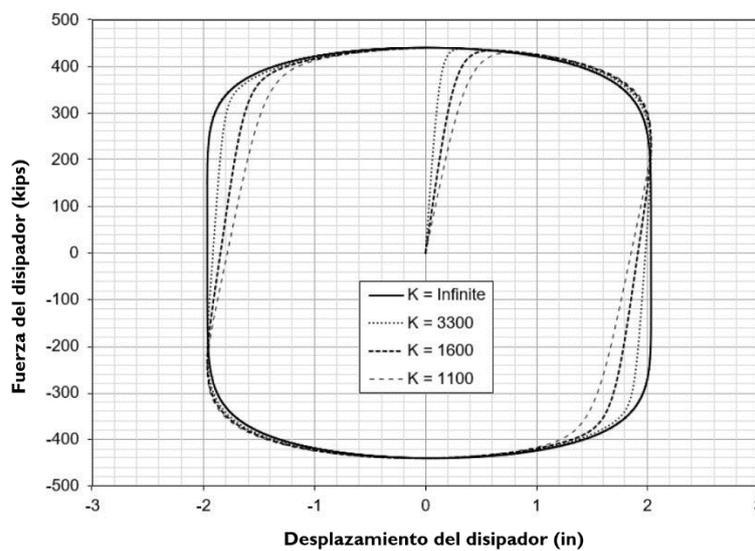
Cualquier combinación de coeficientes de amortiguamiento y valores de exponentes de velocidad está disponible. Sin embargo, se recomienda que solo se utilicen una o dos combinaciones para un proyecto individual. Es mejor amortizar costos de pruebas en tantos amortiguadores como sea posible y, en muchos casos, las propiedades del amortiguador se pueden agrupar de manera efectiva para minimizar los costos de fabricación y optimizar el rendimiento.

Rigidez del brazo metálico (K): La constante de amortiguamiento es la variable que comanda el comportamiento de amortiguador de fluido viscoso; sin embargo, no se debe

descuidar las propiedades complementarias que se ingresaran al modelo como lo es la rigidez del brazo metálico, aunque no participe en la ecuación constitutiva (33) de FVDs.

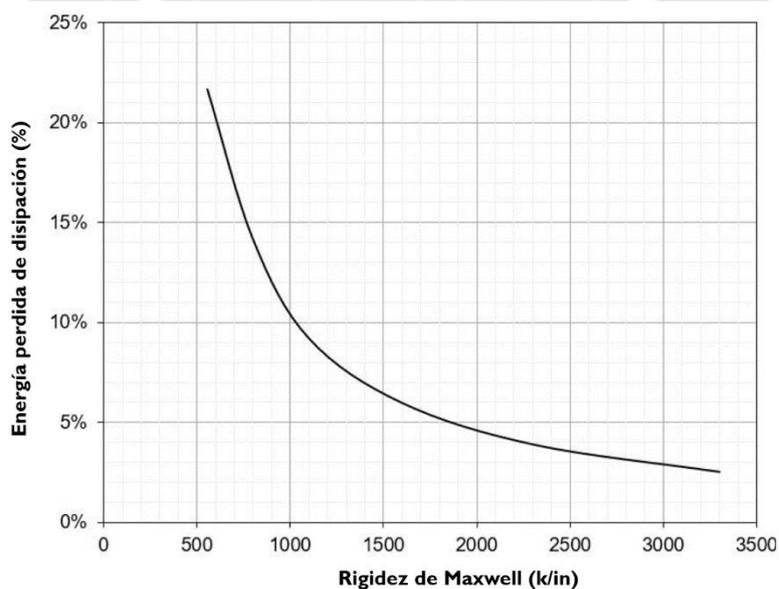
Escoger una valor inadecuado llevaría a que los datos procesados no correspondan con el comportamiento real del amortiguador. El **Gráfico 4.5** muestra la respuesta Fuerza vs Desplazamiento de un amortiguador no lineal que está sometido a una misma excitación armónica donde la rigidez es el parámetro variable. El **Gráfico 4.6** ilustra la reducción en la disipación total de energía en función de la rigidez. Estos gráficos resumen la influencia que tiene el valor de la rigidez en la lectura de resultados.

Gráfico 4.5 Fuerza de amortiguamiento no lineal – Desplazamiento de respuesta



Adaptado de (Taylor Devices, 2020)

Gráfico 4.6 Eficiencia de amortiguación no lineal – Rigidez de Maxwell



Adaptado de (Taylor Devices, 2020)

El presente proyecto seguirá las recomendaciones dadas en el *Fluid Viscous Dampers- General Guidelines for Engineers* publicado por *Taylor Devices*, el cual para el diseño de fuerza escogido nos brinda el número de modelo y la rigidez efectiva del brazo metálico.

4.2.2 Amortiguadores de fluido viscoso en la base del edificio

Se seguirá empleando el uso de la ecuación constitutiva (33) que describe el comportamiento de los FVDs, ya que solo se cambia la posición de los amortiguadores. El objetivo de hallar el valor del coeficiente de amortiguamiento " C " no varía, se trabajará con valores de " α " ya predefinidos. El diseño se adicionará directamente a los sistemas aislados, sin realizar alguna variación en las propiedades de los aisladores.

A diferencia del diseño convencional de los amortiguadores de fluido viscoso, en este caso no se tiene un parámetro objetivo al cual se quiera llegar. En lugar de definir el valor óptimo de deriva o amortiguación, la presente tesis propone el método de análisis de eficiencia (E), el cual consiste en analizar la estructura para distintos valores de amortiguamiento con el fin de encontrar un valor óptimo de acuerdo a los estándares que se definirán para el sistema híbrido.

En síntesis, para el diseño de los amortiguadores de fluido viscoso es necesario definir la estructura más eficiente del análisis realizado al variar la constante de amortiguamiento. Los criterios del método de eficiencia (E) serán explicados a continuación.

4.2.2.1 Evaluación de eficiencia (E)

El objetivo de esta evaluación consiste en identificar el valor de constante de amortiguamiento adecuado para la estructura analizada, análogamente con el diseño convencional donde ese parámetro es el valor a calcular.

Es posible realizar la comparación de comportamientos entre diferentes estructuras utilizando algunos indicadores que describan el desempeño de estas. Estos indicadores nos permitirán cuantificar la eficiencia de cada sistema, lo que será necesario en este proyecto para seleccionar el sistema híbrido adecuado que será comparado con la estructura aislada.

Los parámetros que están involucrados en el análisis de eficiencia son la fuerza basal en las estructuras, derivas de entre piso y desplazamientos.

Variación en fuerza basal (F): La fuerza total sísmica que se da en la base de la superestructura se conoce como fuerza cortante basal, es una representación de la aceleración con que responde la edificación a un movimiento en la base.

El sistema híbrido de disipación de energía contempla un funcionamiento diferente al sistema aislado, la adición de los amortiguadores de fluido viscoso en la base de la estructura genera un cambio en la aceleración de respuesta que se da en la edificación. Se prevé que este nuevo sistema responderá con una fuerza cortante basal mayor a la producida por el sistema aislado. Para el cálculo de la eficiencia se utilizará la relación entre la fuerza basal del sistema híbrido respecto al sistema aislado.

Evaluación de derivas (Dr): Diversas normas enfocan el control del diseño estructural en prever una adecuada seguridad referida al desempeño sísmico que desarrollara la estructura ante una actividad sísmica.

Lograr un adecuado desempeño sísmico implica evitar serios daños, garantizar el funcionamiento de instalaciones críticas y minimizar el costo de reparación que se podría obtener. Teniendo mucha más importancia para edificaciones con mayores exigencias.

Los indicadores que se usan para parametrizar el desempeño en las edificaciones son las derivas de entrepiso. Estas están ligadas directamente al daño estructural que pueda producirse. De acuerdo a la Norma Técnica E.031 la máxima deriva en la superestructura para un “análisis modal espectral no debe exceder a 3.5 ‰” y por un “análisis Tiempo-Historia no debe exceder el 5 ‰”.

La **Figura 4.3** muestra parámetros de desempeño que se requiere para el diseño. La escala vertical es la probabilidad de que el movimiento del suelo con MCE_R sea el más raro considerado. La escala horizontal es el nivel de rendimiento previsto para la estructura y componentes no estructurales, que van desde el colapso hasta el funcionamiento.

El objetivo de prevención de colapsos en el MCE_R para estructuras ordinarias (categoría de riesgo II) se muestra en la parte inferior derecha con un triángulo sólido. La protección contra daños que ponen en peligro la vida en el movimiento del suelo se muestra mediante el triángulo abierto. El desempeño implícito para las categorías de riesgo III y IV se muestra con cuadrados y círculos, respectivamente.

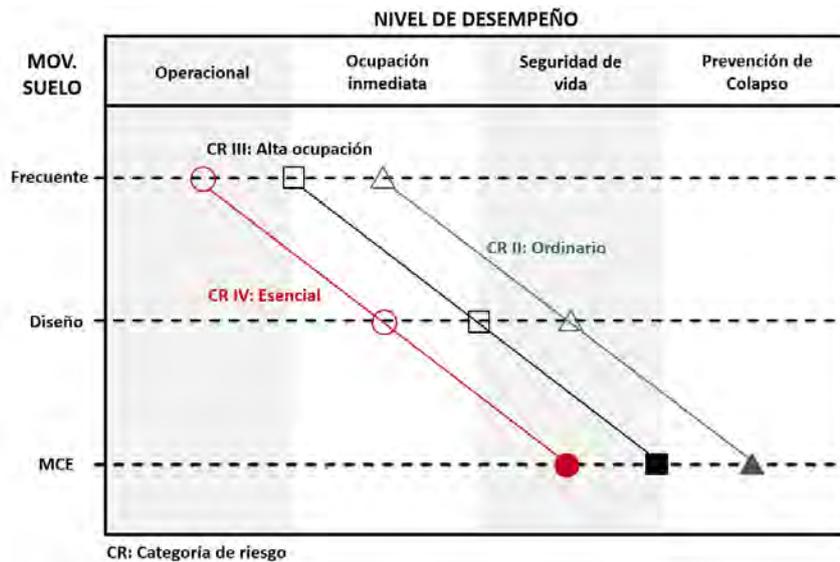


Figura 4.3 Rendimiento esperado en relación con la categoría de riesgo y el nivel de movimiento del suelo

Adaptado de (FEMA P-1050, 2015)

La **Tabla 4.2** detalla el desempeño para estructuras de base fija (B) y con edificaciones aisladas (A). Se observa la variación que se espera en el comportamiento de estas estructuras. El desempeño de la estructura con el sistema híbrido no debe ser menor.

Tabla 4.2 Rendimiento esperado para terremotos menores, moderados y mayores

Medida de rendimiento	Nivel de movimiento del suelo en un terremoto		
	Menor	Moderado	Mayor
Seguridad de vida: no se espera la muerte o lesiones graves	B, A	B, A	B, A
Daño estructural: no se esperan daños estructurales significativos	B, A	B, A	A
Daños no estructurales: no se esperan daños no estructurales o de contenido significativos	B, A	A	A

B: Base fija, A: Aislado

Adaptado de (FEMA P-750, 2009)

En estructuras aisladas el desempeño requerido es más estricto en comparación al de una de base fija. El porcentaje de daño que se presenta en la edificación debe ser mínima, esto va ligado a la funcionalidad de la misma luego de un evento sísmico. La rigurosidad se debe al limitar los valores de derivas de entre piso y aceleraciones de entre piso que se tengan, algo que con la aplicación del sistema de protección sísmica es posible.

Es necesario conocer los límites de los valores de derivas de entre piso para poder realizar una comparación. Para fijar una parametrización adecuada de las derivas permitidas en estructuras aisladas se utilizará la metodología *HAZUS – MH*. Se utilizan

para estimar el costo de reparación de pérdidas en el sistema estructural y no estructural.

Esta metodología conlleva a limitar las derivas y aceleraciones para diferentes tipos de edificaciones, las cuales están ligadas a definir ciertos niveles de desempeño. Se estiman resultados para edificaciones individuales, pero los resultados se consideran para un grupo de edificios similares. Esto contribuye en poder utilizar los valores definidos como parámetros de comparación.

La **Tabla 4.3** cuantifica en valores de derivas el nivel de daño de la estructura para diferentes tipos de edificaciones correspondiente para códigos de alta exigencia en edificaciones especiales y la **Tabla 4.4** para códigos moderados. Es importante tenerlos definidos ya que se usarán estos parámetros como rangos de variabilidad en cuanto a la comparación de desempeños entre diferentes sistemas de protección sísmica.

Es decir, ya no solo realizar la comparación en valores, sino en términos de performance de la estructura. En el presente proyecto se considerará un edificio Tipo C2M de 5 pisos para la estructura *E1*, para las estructuras *E2* y *E3* se considera Tipo C1M.

Tabla 4.3 Derivas ligadas al nivel de daño referido a cada tipo de estructura – Código alta exigencia

Código	Descripción	Altura		Deriva referido al nivel de daño (‰)			
		Nombre	Pisos	Leve	Moderado	Extenso	Completo
C1L	Pórticos de concreto armado	Baja altura	1-3	6.3	12.5	37.5	100.0
C1M		Altura mediana	4-7	4.2	8.3	25.0	66.7
C1H		Alta altura	8+	3.1	6.3	18.8	50.0
C2L	Muros de corte de concreto armado	Baja altura	1-3	5.0	12.5	37.5	100.0
C2M		Altura mediana	4-7	3.3	8.3	25.0	66.7
C2H		Alta altura	8+	2.5	6.3	18.8	50.0
PC2L	Estructura de hormigón prefabricado con muros de corte	Baja altura	1-3	5.0	10.0	30.0	87.5
PC2M		Altura mediana	4-7	3.3	6.7	20.0	58.3
PC2H		Alta altura	8+	2.5	5.0	15.0	43.8

Fuente: Adaptado de (HAZUS-MH 2.1, 2015)

Tabla 4.4 Derivas ligadas al nivel de daño referido a cada tipo de estructura – Código exigencia moderada

Código	Descripción	Altura		Deriva referido al nivel de daño (‰)			
		Nombre	Pisos	Leve	Moderado	Extenso	Completo
C1L	Pórticos de concreto armado	Baja altura	1-3	6.3	10.8	29.2	75.0
C1M		Altura mediana	4-7	4.2	7.2	19.4	50.0
C1H		Alta altura	8+	3.1	5.4	14.6	37.5
C2L	Muros de corte de concreto armado	Baja altura	1-3	5.0	10.5	28.9	75.0
C2M		Altura mediana	4-7	3.3	7.0	19.3	50.0
C2H		Alta altura	8+	2.5	5.3	14.5	37.5
PC2L	Estructura de hormigón prefabricado con muros de corte	Baja altura	1-3	5.0	8.7	23.4	65.6
PC2M		Altura mediana	4-7	3.3	5.8	15.6	43.8
PC2H		Alta altura	8+	2.5	4.3	11.7	32.8

Fuente: Adaptado de (HAZUS-MH 2.1, 2015)

La siguiente **Tabla 4.5** presume los valores máximos de aceleración del piso utilizados para definir “los valores medianos de las curvas de fragilidad para controlar el daño en

componentes no estructurales sensibles a la aceleración de los edificios” (HAZUS-MH 2.1, 2015).

Tabla 4.5 Aceleraciones máximas de piso utilizadas para definir valores medianos de daño a componentes sensibles a la aceleración no estructural

Adaptado de (HAZUS-MH 2.1, 2015)

Nivel de diseño sísmico	Aceleración del piso para el nivel de daño no estructural (g)			
	Leve	Moderado	Extenso	Completo
Código alto	0.30	0.60	1.20	2.40
Código moderado	0.25	0.50	1.00	2.00
Código bajo	0.20	0.40	0.80	1.60
Pre-código	0.20	0.40	0.80	1.60

Para el cálculo de la eficiencia se utilizará la relación entre derivas del sistema híbrido respecto al sistema aislado.

Evaluación de desplazamiento (D): “Los grandes desplazamientos laterales y las cargas axiales sobre aisladores influyen en: la carga crítica, rigidez horizontal, dimensiones de los aisladores, volcamiento” (Nagarajaiah, Ferrel, 1999). Esto representa en una limitante a las propiedades de los aisladores.

La finalidad del sistema híbrido es la reducción del desplazamiento, lo cual implica obtener diferente respuesta estructural que está contemplada en los parámetros previos. Para el cálculo de la eficiencia se utilizará el porcentaje de reducción de desplazamiento en la base del sistema híbrido respecto al sistema aislado.

Eficiencia (E): Es necesario establecer un parámetro para comparar la eficiencia que se tiene por cada valor amortiguación. Será calculado en base a los valores previos de deriva (D_r), desplazamiento (D) y fuerza basal (F). Todos siendo obtenidos respecto a los resultados del sistema aislado al que se le añaden directamente los amortiguadores.

Según los valores obtenidos se sabe que dos parámetros indican excedencia del sistema híbrido respecto al sistema aislado, los cuales son deriva y fuerza. El caso del desplazamiento es el único que nos indica una reducción en valores.

Por ende, se propone que la eficiencia sea medida de la siguiente forma:

$$E_{(D,D_r,F)} = \frac{(D + 1)^n}{F^a D_r^m} \quad (37)$$

Indicando los valores de a, n, m como factores de importancia para cada parámetro. Los valores que se usaran para en análisis son $a = 1.05, m = 1.36$ y $n = 2.25$. Cada

estructura caracterizada por un valor fijo de “ C ” será representado por un valor de eficiencia (E), entre mayor sea este valor se considerará como un sistema más óptimo. Se presentan gráficos que representaran estos resultados.

Al ser el objetivo del sistema híbrido la búsqueda de reducción del desplazamiento, este valor incrementará la eficiencia del sistema. Caso contrario, para los restantes que afectan directamente el desempeño de la estructura y por ende deben reducir la eficiencia de la misma.

Los parámetros de deriva y desplazamiento tienen mayor importancia, este concepto está reflejado en los factores que representan a cada uno, debido a que están ligados directamente al desempeño de la estructura y al propósito de la adición de los amortiguadores que es reducir el desplazamiento en la base. Por ello, esos parámetros se analizarán con mayor profundidad.

La relación entre los parámetros que permiten obtener los valores de eficiencia no está explícitamente definida en un texto previo, la ecuación (37) es una propuesta de la tesis. Sin embargo, si es mencionado que estos parámetros, variables para cada estudio, definen el comportamiento del sistema y su análisis permite obtener un punto de comparación. Se utilizaron los siguientes estudios para definir estos parámetros:

“Effect of LRB Isolation and supplemental viscous dampers on seismic isolated buildings under near fault excitations” (Providakis, 2007) donde se analizan las variaciones de derivas respecto al cambio de periodo de la estructura, *“Design of a Seismic Isolation System with Supplemental Viscous Damping for a Near Fault Essential Services Facility” (Hussain, Mohamed, 2008)* analiza la variación de la aceleración y fuerza cortante de la superestructura, *“The Behavior of Multi-Story Buildings Seismically Isolated System Hybrid Isolation” (Barmo et al, 2015)* el cual involucra todos los parámetros previamente mencionados.

CAPÍTULO V: ANÁLISIS DE ELEMENTOS

El proyecto abarca el estudio del comportamiento en 3 estructuras, con la principal variación referido a sus flexibilidades. Para cada una se presentará: la distribución de cómo estructura de base fija (que será la superestructura de los demás sistemas) y el diseño final del sistema aislado e híbrido.

5.1 Criterios de modelamiento

Se mencionará brevemente los criterios de modelación en el software *ETABS 2018* del modelo tridimensional que implican los elementos estructurales y los dispositivos para los sistemas de protección sísmica.

Las placas serán modeladas mediante elementos tipo *Wall*, las columnas y vigas mediante elementos tipo *Frame*. En las conexiones entre vigas y columnas se consideraron brazos rígidos. Las losas se modelaron mediante elementos tipo *Membrane*, estas actúan solo como transmisores de fuerzas.

El modelamiento de la estructura aislada se realiza retirando los apoyos en la base del modelo empotrado y definiendo la plataforma de aislamiento. Esta interfaz consiste en vigas con peralte considerable, este elemento uniformiza los elementos estructurales como columnas y placas.

La transmisión de fuerzas hacia los dispositivos se realiza por medio de pedestales considerados con 0.5 m de altura. Se elaboró la **Figura 5.1** donde se esquematiza este modelamiento.

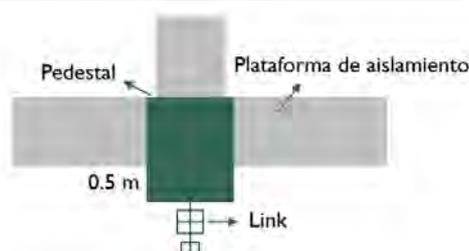


Figura 5.1 Modelo en la plataforma de aislamiento

Los aisladores LRB son definidos como elementos tipo *link* en la categoría *Rubber Isolator*, y se ubican debajo de los pedestales mencionados en la parte previa. La **Figura 5.2** muestra la pantalla de ingreso para las propiedades.

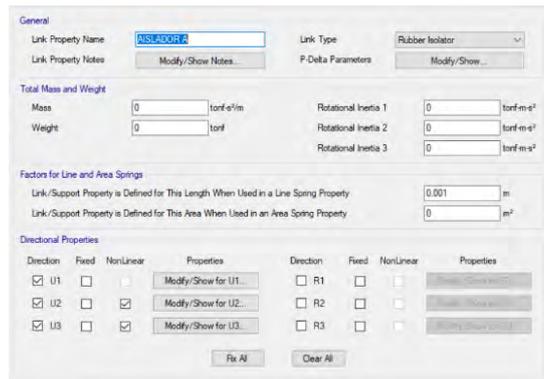


Figura 5.2 Pantalla de ingreso de propiedades para elementos tipo link

Para la verificación de tracciones se utilizan aisladores adicionales tipo *link* en la categoría *Gap*. En la **Figura 5.3** se observa el tipo de estos dispositivos.



Figura 5.3 Cambio hacia el tipo link Gap de los aisladores

La conexión de los amortiguadores de fluido viscoso será directamente con la platea de aislamiento, estos son definidos como elementos tipo link en la categoría *Damper – Exponential*. La **Figura 5.4** muestra lo descrito previamente.



Figura 5.4 Link Damper – Exponential para los amortiguadores de fluido viscoso

5.2 Estructura convencional de base fija

La distribución tanto arquitectónica y estructural será simple, ya que la finalidad es estudiar la variación en el comportamiento que se tenga al analizar distintos sistemas. Cada una cumple los criterios definidos en el inciso **3.1**.

Las estructuras *E1* y *E2* son de 5 pisos con 3.2 m de altura cada uno siendo un total de 16 m, la estructura *E3* presenta 7 pisos de 3 m de altura. Todas las estructuras presentan plantas típicas con las siguientes dimensiones: 35x35 m, con un perímetro de 140 m y un área de 1200.5 m². Se elaboró la **Tabla 5.1** que presenta la relación entre *Peso sísmico/Área*.

Tabla 5.1 Relación Peso sísmico/Área para todas las estructuras

Nivel	Estructura 1 (E1)	Estructura 2 (E2)	Nivel	Estructura 3 (E3)
	P/A (ton/m ²)	P/A (ton/m ²)		P/A (ton/m ²)
5	0.745	0.776	7	0.769
4	0.928	0.950	6	0.937
3	0.928	0.950	5	0.937
2	0.928	0.950	4	0.937
1	0.928	0.950	3	0.937
			2	0.937
			1	0.937

La estructura E1 es un sistema dual el cual contiene muros estructurales, pórticos, vigas, columnas y losas macizas en dos direcciones; las estructuras E2 y E3 ya no presentan muros estructurales. Se planteó que estos sistemas no presenten irregularidades para que el estudio del funcionamiento de la misma no tenga percances para este sentido.

La **Tabla 5.2** detalla la distancia relativa entre el Centro de Rigidez (CR) y el Centro de Masas Acumulado (CCM) para las estructuras.

Tabla 5.2 Distancia relativa entre el Centro de Rigidez y el Centro de Masas Acumulado

Desplazamiento relativo (m)					
E1		E2		E3	
XCR-XCCM	YCR-YCCM	XCR-XCCM	YCR-YCCM	XCR-XCCM	YCR-YCCM
0.304	-0.091	0.477	0.060	0.350	0.065

La **Figura 5.5** muestra la vista tridimensional y **Figura 5.6** la planta típica de todas las estructuras.

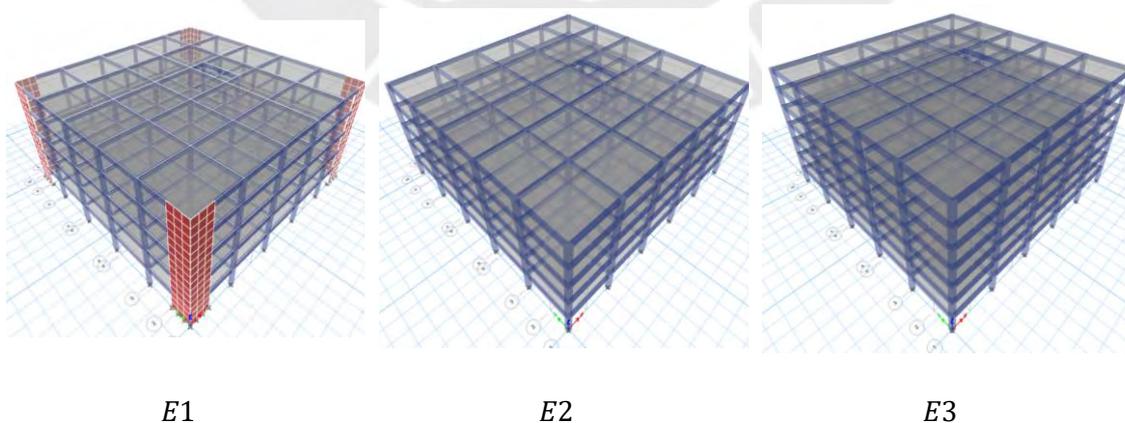


Figura 5.5 Modelo tridimensional de todas las estructuras

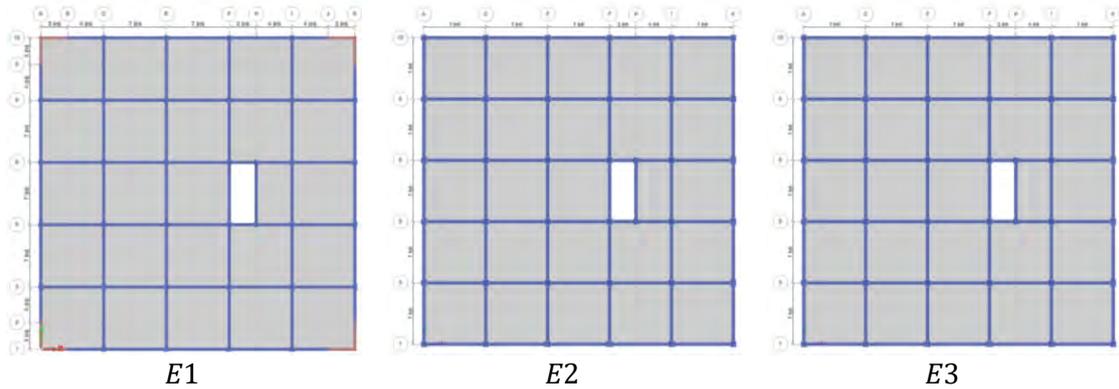


Figura 5.6 Vista de planta típica

Se consideró la variación en la rigidez de las estructuras, a fin de analizar la incidencia de la flexibilidad en los resultados. Se elaboró la **Tabla 5.3** que muestra los resultados modales.

Tabla 5.3 Periodo y masa participante para cada estructura – Base Fija

Modo	E1				E2				E3			
	Periodo (s)	Masa participante			Periodo (s)	Masa participante			Periodo (s)	Masa participante		
		ΣX (%)	ΣY (%)	ΣZ (%)		ΣX (%)	ΣY (%)	ΣZ (%)		ΣX (%)	ΣY (%)	ΣZ (%)
1	0.56	0.28%	74.83%	0.02%	0.74	0.01%	79.16%	3.35%	0.93	0.003%	80.18%	0.90%
2	0.55	75.24%	75.12%	0.03%	0.72	82.65%	79.18%	3.42%	0.90	81.18%	80.19%	0.96%
3	0.35	75.25%	75.15%	72.31%	0.69	82.73%	82.52%	82.53%	0.85	81.24%	81.08%	81.27%
4	0.14	75.27%	92.14%	72.31%	0.23	82.74%	92.71%	82.96%	0.29	81.24%	91.19%	81.41%
5	0.14	92.21%	92.16%	72.31%	0.23	93.30%	92.72%	82.97%	0.29	91.49%	91.19%	81.41%

5.3 Estructura con aislamiento sísmico

Debido a que se desea cuantificar la variación entre comportamientos de las estructuras, no se modificarán los elementos estructurales que componen las edificaciones de base fija. Con estos parámetros fijos se realizó el diseño de los aisladores.

El concepto del aislamiento sísmico es separar la estructura, mediante una interfaz de aislamiento, del suelo en orden de evitar daños por un sismo. Se presenta una gran disipación en esta interfaz, lo restante se disipa por la superestructura produciendo reducción de derivas y aceleraciones de entrepiso.

5.3.1 Estructuras y distribuciones de aisladores

La **Figura 5.7** muestra la vista tridimensional de los modelos aislados y la **Figura 5.8** muestra la vista elevación de las estructuras.



Figura 5.7 Modelo tridimensional de las estructuras aisladas

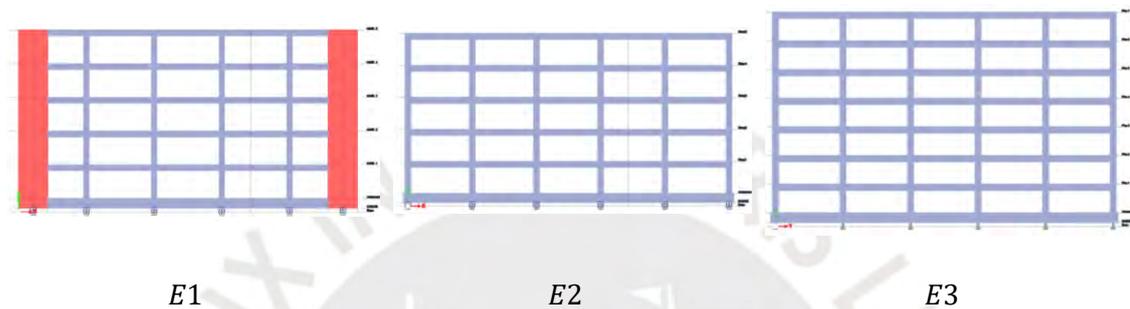


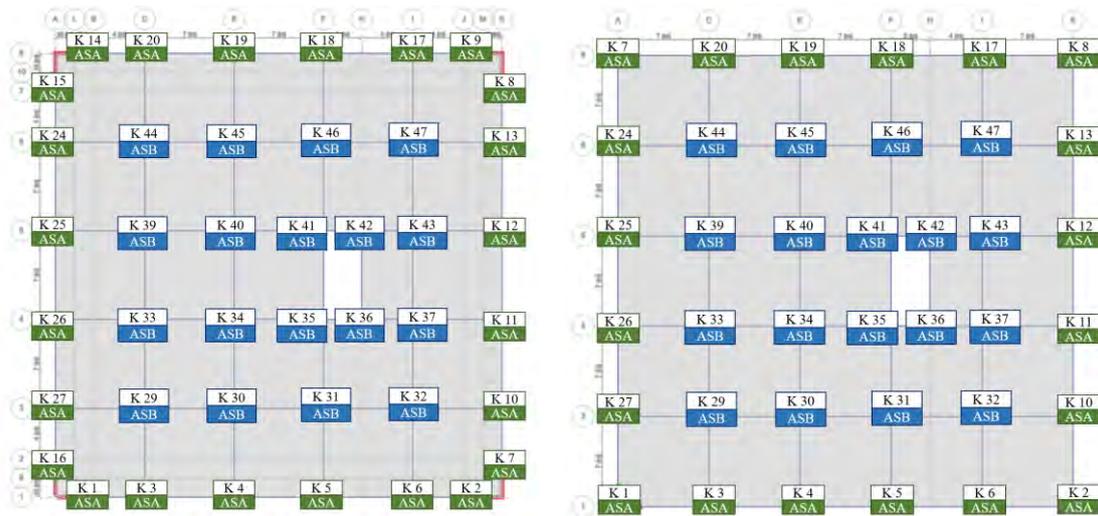
Figura 5.8 Vista elevación del modelo aislado Eje 1

La estructura *E1* presenta un total de 42 aisladores ubicados debajo de elementos estructurales como muros y columnas. Se trabajaron con dos aisladores LRB: un grupo de 18 aisladores se ubicaron en la zona central y los 24 restantes en el perímetro. Las estructuras *E2* y *E3* presentan 38 aisladores en total, donde hay 20 aisladores perimetrales.

Las ubicaciones de los aisladores en las placas de la estructura se distribuyeron con la premisa de evitar la tracción en los aisladores; por ello, no se ubicaron en las esquinas de las placas sino en zonas centrales.

Las cargas verticales en servicio en los aisladores para cada estructura se detallan en el **Anexo D**. Los valores máximos en la estructura *E1* son 140 y 246 ton para los aisladores *A* y *B* respectivamente, en *E2* son 174 y 255 ton; y por último en *E3* son 210 y 339 ton.

Se elaboró **Figura 5.9** para detallar la ubicación de los aisladores en la planta de la estructura.



E1

E2 y E3

Figura 5.9 Distribución de los aisladores

5.3.2 Diseño nominal de los aisladores

Para el diseño de aisladores se partió de un análisis estático de 1 GDL detallado en el inciso 3.2.1. El paso inicial es asumir el periodo de la estructura aislada T_M y el amortiguamiento β_M . Mediante la Ec. (28) se obtendrá la rigidez efectiva K_M , la cual debe ser distribuida entre los N dispositivos.

Se utilizarán los datos de la **Tabla 3.4** para el cálculo de las propiedades lineales de estos dispositivos. Se obtiene el desplazamiento máximo D_M con la Ec. (27) y con la Ec. (29) el desplazamiento máximo total D_{TM} , al comparar los resultados se define que por la Ec. (30) el valor que tomará D_{TM} . Se elaboró la **Tabla 5.4** para presentar las asunciones iniciales del diseño de aisladores nominales en todas las estructuras.

Tabla 5.4 Parámetros nominales para el análisis estático

	E1	E2	E3
Periodo base fija, T(s)	0.56	0.74	0.93
Periodo objetivo $T_M=3T$	1.68	2.22	2.79
Amortiguamiento efectivo β_M (%)	15	16	16
Factor de amortiguamiento, B_M	1.35	1.38	1.38
Peso sísmico, P (ton)	6629	6769	8935
Rigidez efectiva, K_M (ton/m)	9450	5527	4620
S_{am} (g)	0.402	0.304	0.222
D_M (cm)	20.1	26.98	30.4
Coefficiente de amortiguamiento, C (ton.s/m)	859	625	663

Estos valores son necesarios para realizar la primera instancia de iteración la cual incluye: la verificación modal, desplazamientos y derivas (realizadas mediante un análisis modal espectral). En el diseño nominal se debe cumplir que la deriva no sea

mayor al 70% definido por la norma de 3.5 ‰ para un análisis espectral y 4.5 ‰ para un análisis Tiempo-Historia.

Luego de realizar la primera corrección de valores, se calculan las propiedades no lineales de los aisladores que definen sus modelos histeréticos. Se emplearán las ecuaciones presentes en el inciso **2.1.1.3**.

El proceso iterativo continua mediante el análisis dinámico Tiempo-Historia, este culmina cuando las siguientes asunciones se cumplan: verificación modal, rigidez efectiva, amortiguamiento efectivo, derivas, aceleraciones y desplazamientos.

El **Gráfico 5.1**, el **Gráfico 5.2** y el **Gráfico 5.3** muestran los modelos bilineales de los dispositivos. Se elaboró **Tabla 5.5** para detalla las propiedades no lineales de los aisladores nominales diseñados de todas las estructuras.

Gráfico 5.1 Modelo bilineal nominal de los aisladores A y B (E1)

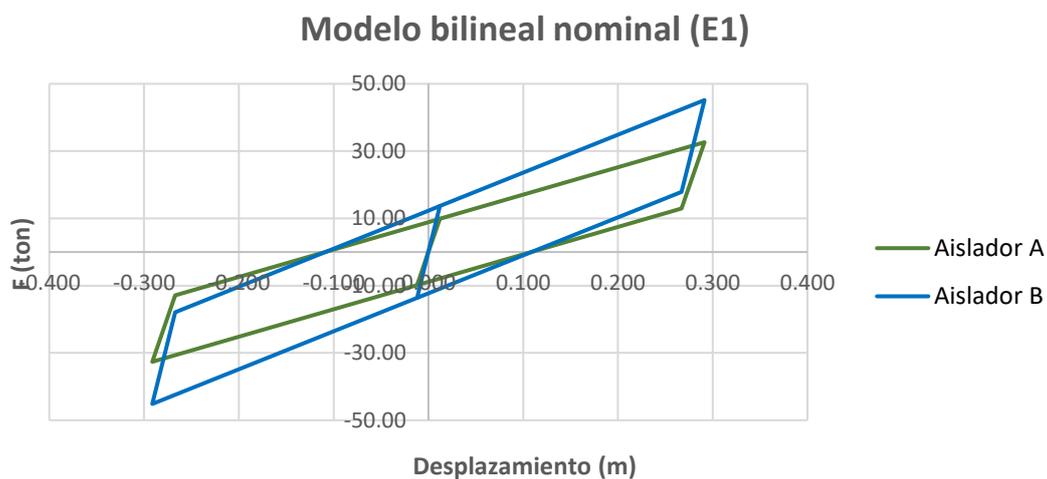


Gráfico 5.2 Modelo bilineal nominal de los aisladores A y B (E2)

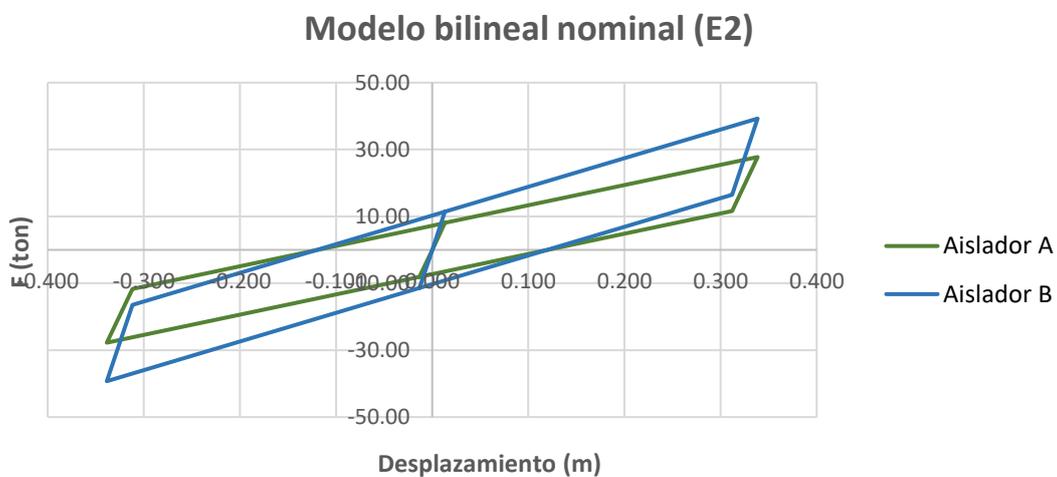


Gráfico 5.3 Modelo bilineal nominal de los aisladores A y B (E3)

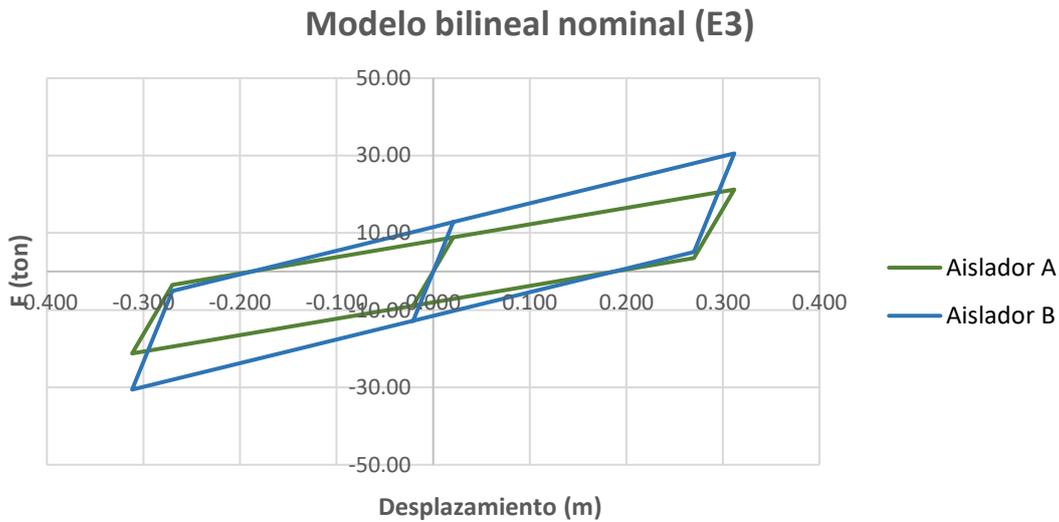


Tabla 5.5 Propiedades no lineales de aisladores nominales

Estructura	Tipo aislador	Qd (ton)	Fy (ton)	K2 o Kd (ton/m)	K1 o Ke (ton/m)	β_{eff} (%)	Ceff (ton.s/m)	Keff (ton)	N	W (ton)	Pu máx (ton)	DM (cm)	D'M (cm)	DTM (cm)
E1	A	8.9	9.9	81.5	815	16.6%	15.6	112	24	140	360	26.2	25.3	29.1
	B	12.3	13.6	112.9	1129	16.6%	15.6	155	18	250	430	26.2	25.3	29.3
E2	A	7.2	8.1	60.6	606	16.0%	13.4	82	20	180	360	30.4	29.3	33.9
	B	10.3	11.4	85.7	857	16.0%	13.4	116	18	260	450	30.4	29.3	35.1
E3	A	8.0	8.9	42.4	424	22.3%	19.2	68	20	210	480	27.1	26.2	31.2
	B	11.5	12.8	61.1	611	22.3%	19.2	98	18	300	600	27.1	26.2	31.3

5.3.3 Modificación de las propiedades de los aisladores

De acuerdo a lo detallado en el inciso 3.1.5 se deben contemplar factores de modificación de propiedades de los aisladores del diseño nominal. Se obtendrán propiedades no lineales para el límite superior, emplea el factor $\lambda_{máximo}$, y para el límite inferior que usa el factor de $\lambda_{mínimo}$.

El sistema de aislamiento con las propiedades del límite superior es menos eficiente, esto es debido al incremento de derivas en la superestructura. Por otro lado, las propiedades del límite inferior originan una reducción en las derivas y presentan un mayor desplazamiento de la plataforma de aislamiento. Se utilizarán los factores presentados en **Tabla 5.6** elaborada, considerando que son dispositivos de Clase I.

Tabla 5.6 Factores de modificación máximos y mínimos

Factores	Aislador de caucho con núcleo de plomo	
	k2 o Kd	Q o Qd
$\lambda_{máximo}$	1.3	1.5
$\lambda_{mínimo}$	0.8	0.8

En el **Anexo A** se presentan en tablas las propiedades no lineales de los límites superior, inferior y nominal de los aisladores A y B considerando los factores ya definidos en la tabla previa. A partir de estos datos se obtienen los modelos bilineales para cada uno de los aisladores. El **Gráfico 5.4**, el **Gráfico 5.5** y el **Gráfico 5.6** muestran el modelo bilineal de los aisladores A y B para las estructuras E1, E2 y E3 respectivamente.

Gráfico 5.4 Modelo bilineal con propiedades modificadas aisladores A y B (E1)

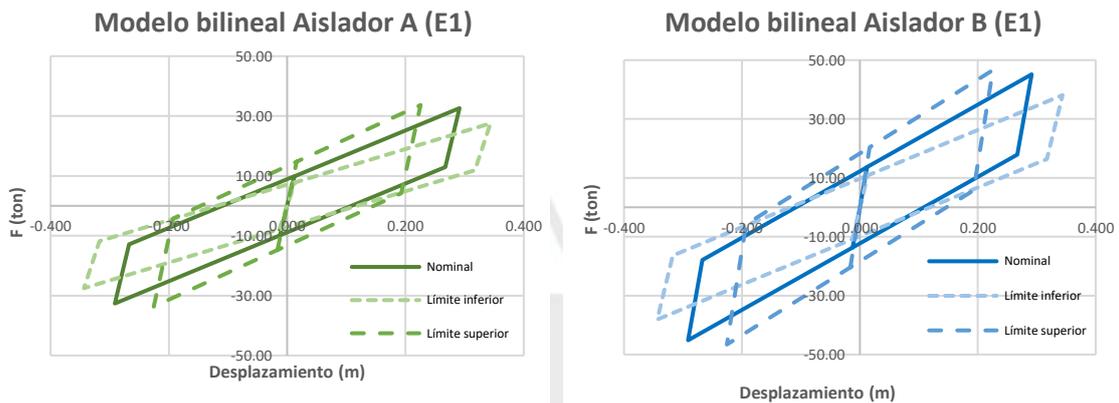


Gráfico 5.5 Modelo bilineal con propiedades modificadas aisladores A y B (E2)

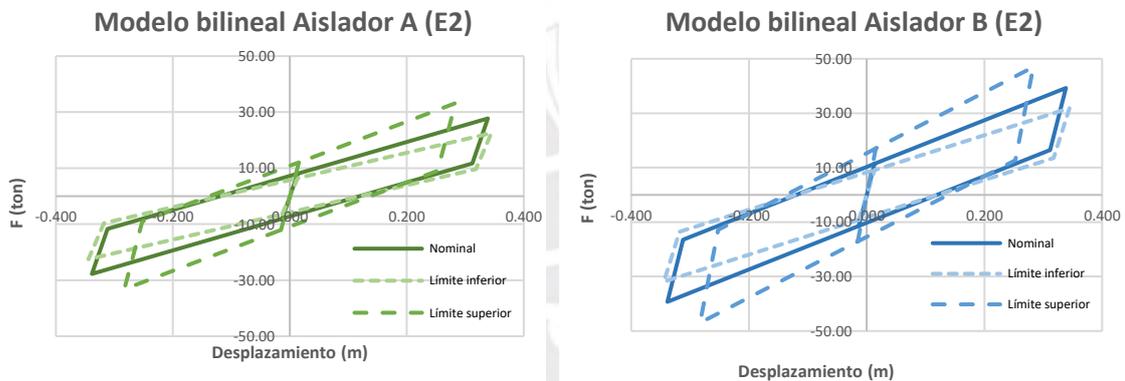
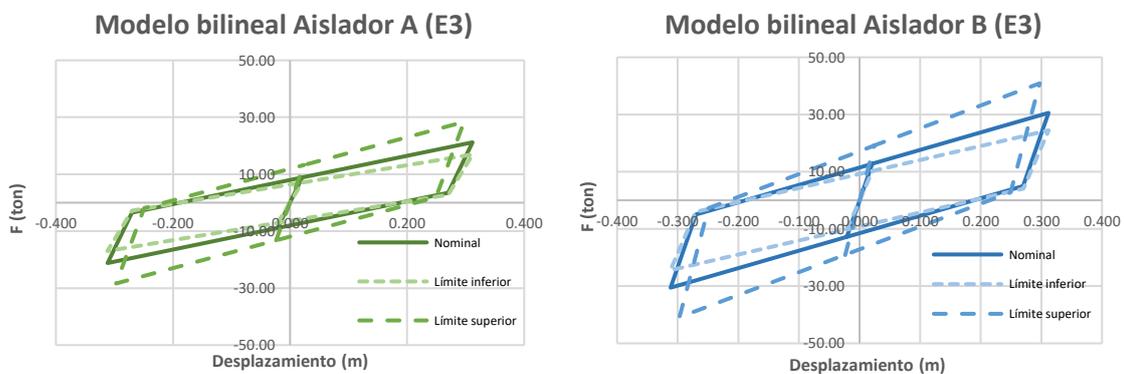


Gráfico 5.6 Modelo bilineal con propiedades modificadas aisladores A y B (E3)



Los modelos bilineales del sistema de aislamiento para las propiedades modificadas están detallados en el **Anexo B**. Se elaboró la **Tabla 5.7** para detallar las propiedades no lineales del sistema considerando los aportes de todos los aisladores, en todas las instancias de diseño.

Tabla 5.7 Propiedades no lineales del sistema de aislamiento para cada estructura

Propiedades	Parámetros del sistema (E1)			Parámetros del sistema (E2)			Parámetros del sistema (E3)		
	Límite superior	Nominal	Límite inferior	Límite superior	Nominal	Límite inferior	Límite superior	Nominal	Límite inferior
K1 o Ke (ton/m)	44248	39884	29131	35867	27544	22035	25416	19489	15592
K2 o Kd (ton/m)	4425	3988	2913	3587	2754	2204	2542	1949	1559
K1/K2	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Qd (ton)	649	434	345	494	330	265	548	366	293
Fy (ton)	721	482	384	549	366	294	608	407	325
Dy (mm)	16.29	12.09	13.17	15.31	13.29	13.34	23.94	20.89	20.87
Fmáx (ton)	1647	1596	1346	1509	1262	1024	1303	974	779
Keff (ton/m)	7302	5478	3918	5333	3728	2971	4384	3124	2498
Beff (%)	23.27%	16.59%	15.70%	19.72%	15.97%	15.81%	24.60%	22.34%	22.32%
Desplazamiento (cm)	22.55	29.13	34.36	28.30	33.85	34.45	29.72	31.17	31.20

5.3.4 Resultados modales

Los sistemas son más flexibles, lo que se ve reflejado por el aumento del periodo fundamental de la estructura. Se elaboró la **Tabla 5.8** para presentar los resultados modales de todas las estructuras para el diseño nominal. Cada modo tiene una participación de más del 85% y en los tres primeros modos participa casi toda la masa efectiva.

Tabla 5.8 Periodo y masa participante acumulada de todos los Sistemas Aislado - Nominal

Sistema Aislado - Nominal												
Modo	E1				E2				E3			
	Periodo (s)	Masa participante			Periodo (s)	Masa participante			Periodo (s)	Masa participante		
		ΣX (%)	ΣY (%)	ΣZ (%)		ΣX (%)	ΣY (%)	ΣZ (%)		ΣX (%)	ΣY (%)	ΣZ (%)
1	2.29	3.7%	93.1%	3.1%	2.81	0.4%	85.0%	14.6%	3.55	0.5%	86.4%	15.1%
2	2.28	99.8%	96.9%	3.1%	2.78	99.8%	85.4%	14.6%	3.52	99.7%	87.1%	15.1%
3	2.13	99.9%	99.9%	99.9%	2.69	99.9%	99.8%	99.9%	3.41	99.9%	99.8%	99.8%
4	0.37	99.9%	100.0%	100.0%	0.43	99.9%	99.9%	100.0%	0.53	99.9%	99.9%	99.8%
5	0.36	100.0%	100.0%	100.0%	0.42	100.0%	99.9%	100.0%	0.51	100.0%	99.9%	99.9%

El **Anexo C** contiene los resultados modales para los límites superior e inferior de todas las estructuras comprendidas en el estudio.

5.3.5 Verificación de derivas, aceleraciones y desplazamientos

Se verificaron las derivas en cada dirección de análisis teniendo como premisa que no supere el valor límite de 3.5 ‰ para un análisis modal espectral y de 4.5 ‰ para un análisis de Tiempo – Historia.

El **Gráfico 5.7**, **Gráfico 5.8** y el **Gráfico 5.9** muestran los resultados de análisis de derivas para un análisis modal espectral correspondientes al primer ciclo de iteración,

estos valores cumplen con el límite definido. Según la **Tabla 4.4** para nuestra edificación la deriva menor a 3.3 ‰ presenta daños leves.

Gráfico 5.7 Derivas del análisis modal espectral (E1)

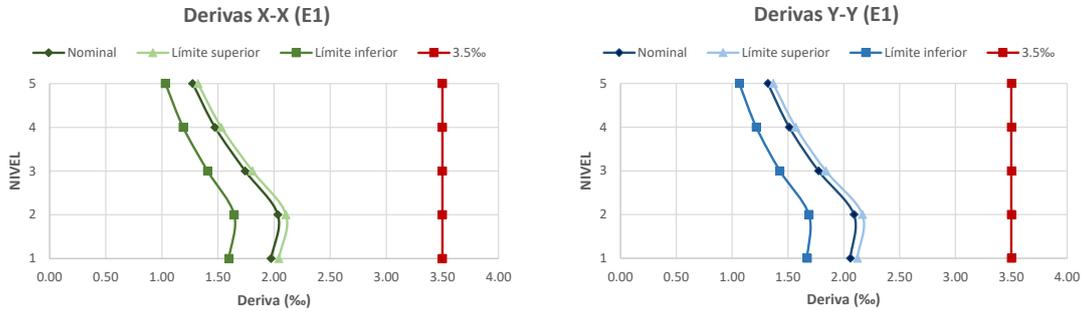


Gráfico 5.8 Derivas del análisis modal espectral (E2)

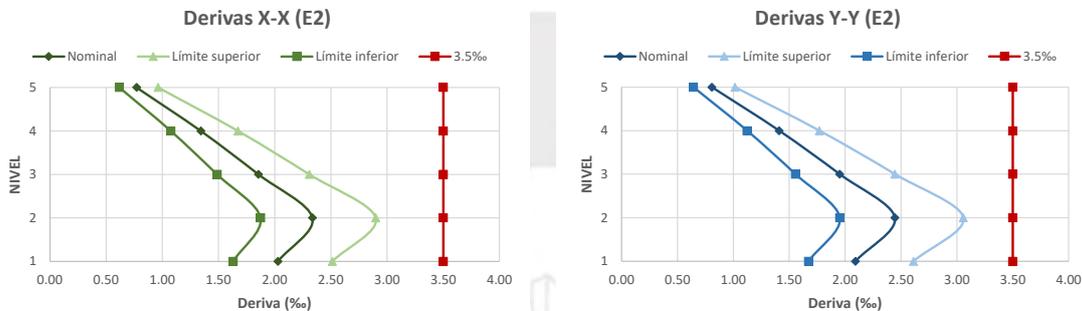
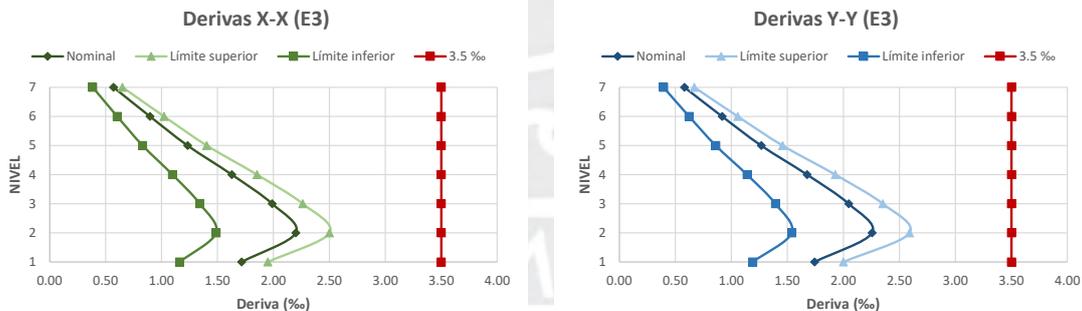


Gráfico 5.9 Derivas del análisis modal espectral (E3)



De manera práctica para los datos de derivas y aceleraciones en el análisis Tiempo-Historia se mostrarán los resultados para el diseño del límite superior en cada estructura, los cuales son detallados en la **Tabla 5.9** y la **Tabla 5.10**. En el caso de desplazamientos se analizará en el límite inferior, estos valores están presentes en la **Tabla 5.11** y la **Tabla 5.12**. Como se definió en la **Tabla 3.8** se seguirá la misma codificación en los registros sísmicos.

Tabla 5.9 Derivas y aceleraciones máximas – Límite superior X

X-X		R. Sísmico 1	R. Sísmico 2	R. Sísmico 3	R. Sísmico 4	R. Sísmico 5	R. Sísmico 6	R. Sísmico 7	Promedio
E1	Deriva (‰)	1.40	2.02	2.45	1.95	1.98	1.78	1.38	1.85
	Aceleración (g)	0.28	0.21	0.27	0.23	0.22	0.23	0.28	0.25
E2	Deriva (‰)	2.22	2.40	1.72	2.42	2.52	1.25	2.57	2.16
	Aceleración (g)	0.24	0.15	0.20	0.19	0.20	0.18	0.19	0.19
E3	Deriva (‰)	1.66	2.20	1.43	1.79	1.58	0.95	1.67	1.61
	Aceleración (g)	0.26	0.24	0.35	0.32	0.30	0.22	0.28	0.28

Tabla 5.10 Derivas y aceleraciones máximas – Límite superior Y

Y-Y		R. Sísmico 1	R. Sísmico 2	R. Sísmico 3	R. Sísmico 4	R. Sísmico 5	R. Sísmico 6	R. Sísmico 7	Promedio
E1	Deriva (‰)	1.72	2.02	2.45	2.03	1.84	1.74	1.80	1.94
	Aceleración (g)	0.25	0.27	0.25	0.22	0.29	0.23	0.18	0.24
E2	Deriva (‰)	2.72	1.89	1.72	2.70	2.52	2.49	2.87	2.42
	Aceleración (g)	0.20	0.18	0.21	0.22	0.19	0.17	0.21	0.20
E3	Deriva (‰)	1.39	1.82	2.38	1.84	1.75	1.33	1.40	1.70
	Aceleración (g)	0.37	0.29	0.34	0.32	0.28	0.23	0.26	0.30

Tabla 5.11 Desplazamientos máximos en la azotea y base – Límite inferior X

X-X		R. Sísmico 1	R. Sísmico 2	R. Sísmico 3	R. Sísmico 4	R. Sísmico 5	R. Sísmico 6	R. Sísmico 7	Promedio
E1	D. Azotea (m)	0.21	0.18	0.25	0.27	0.24	0.26	0.21	0.23
	D. Base (m)	0.19	0.16	0.23	0.25	0.22	0.24	0.19	0.21
E2	D. Azotea (m)	0.25	0.21	0.29	0.31	0.27	0.36	0.26	0.28
	D. Base (m)	0.24	0.19	0.26	0.29	0.25	0.33	0.23	0.26
E3	D. Azotea (m)	0.18	0.24	0.20	0.32	0.22	0.31	0.23	0.24
	D. Base (m)	0.17	0.22	0.18	0.30	0.21	0.29	0.21	0.23

Tabla 5.12 Desplazamientos máximos en la azotea y base – Límite inferior Y

Y-Y		R. Sísmico 1	R. Sísmico 2	R. Sísmico 3	R. Sísmico 4	R. Sísmico 5	R. Sísmico 6	R. Sísmico 7	Promedio
E1	D. Azotea (m)	0.22	0.23	0.25	0.27	0.24	0.26	0.21	0.24
	D. Base (m)	0.20	0.21	0.23	0.25	0.22	0.24	0.19	0.22
E2	D. Azotea (m)	0.24	0.26	0.29	0.32	0.27	0.36	0.26	0.29
	D. Base (m)	0.24	0.24	0.26	0.29	0.25	0.33	0.23	0.26
E3	D. Azotea (m)	0.32	0.32	0.27	0.32	0.19	0.18	0.31	0.27
	D. Base (m)	0.30	0.29	0.24	0.30	0.18	0.17	0.29	0.25

5.3.6 Verificación Ciclo histéresis y Fuerza Restitutiva del sistema

Los diagramas histéresis resultantes del análisis, para cada registro sísmico, deben ser limitadas por el modelo bilineal construido para cada diseño. Se elaboró el **Gráfico 5.10**, el **Gráfico 5.11** y el **Gráfico 5.12** para graficar estos diagramas en el sistema de aislamiento para todas las señales obtenidas en el diseño nominal en cada estructura.

Los **Anexos E** y **F** presentan los resultados en el sistema para diseños de límite superior e inferior. En **Anexos G** y **H** los valores son para los aisladores, se toma un elemento por cada tipo de aislador, para propiedades del límite superior e inferior.

Gráfico 5.10 Diagramas histéresis del Sistema de aislamiento X-X – Nominal – E1

Diagrama histéresis del Sistema - 7 señales X-X - Nominal (E1)

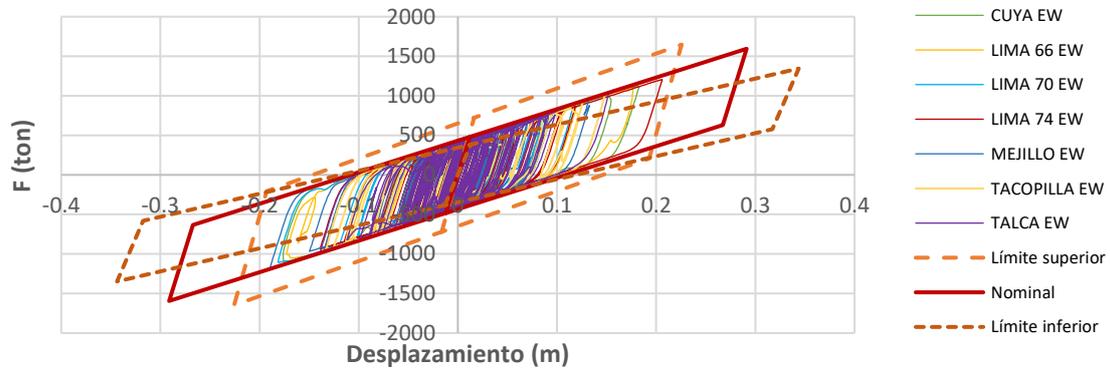


Gráfico 5.11 Diagramas histéresis del Sistema de aislamiento X-X – Nominal – E2

Diagrama histéresis del Sistema - 7 señales X-X - Nominal (E2)

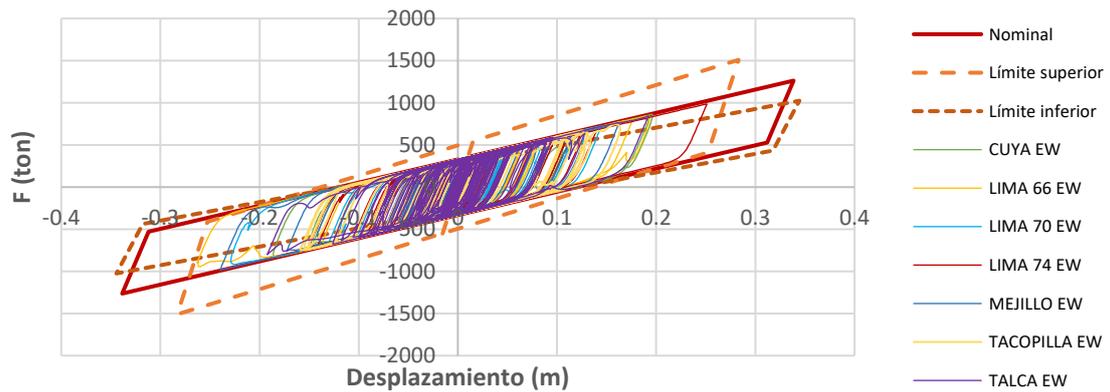
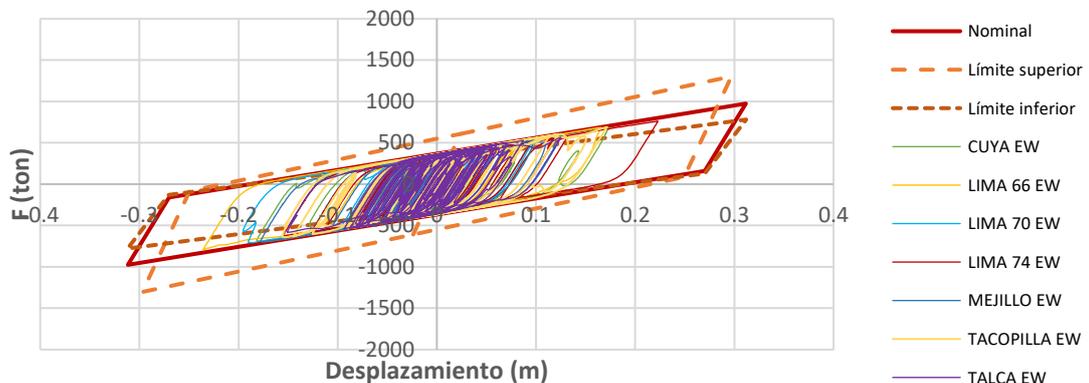


Gráfico 5.12 Diagramas histéresis del Sistema de aislamiento X-X – Nominal – E3

Diagrama histéresis del Sistema - 7 señales X-X - Nominal (E3)



El sistema aislado debe ser diseñado para producir una fuerza lateral de restitución que tenga un valor mínimo de 2.5% del peso sísmico al 50% del desplazamiento máximo, se elaboró la **Figura 5.10** para esquematizar este valor.

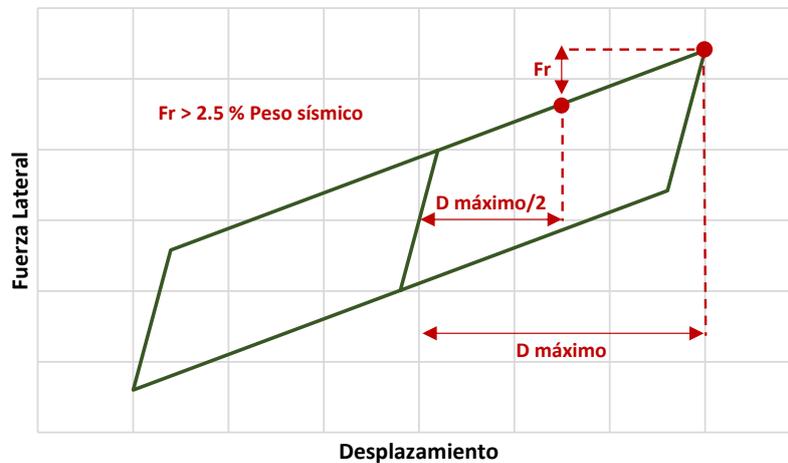


Figura 5.10 Fuerza de restitución lateral

Se mostrará la verificación de la fuerza restitutiva para el límite inferior, debido a que en este diseño al disminuir la pendiente de rigidez post-fluencia la fuerza restitutiva es menor. El **Gráfico 5.13** y el **Gráfico 5.14** muestran los resultados de la relación de fuerzas restitutivas con el peso sísmico para un análisis de Tiempo-Historia en todas las estructuras.

Se observa que la estructura E3 presenta los menores valores siendo 2.51% en la dirección X-X y 2.60% para Y-Y, los resultados cumplen con el límite definido por la norma.

Gráfico 5.13 Fuerzas restitutivas (%P) en todas las estructuras X-X – Límite inferior

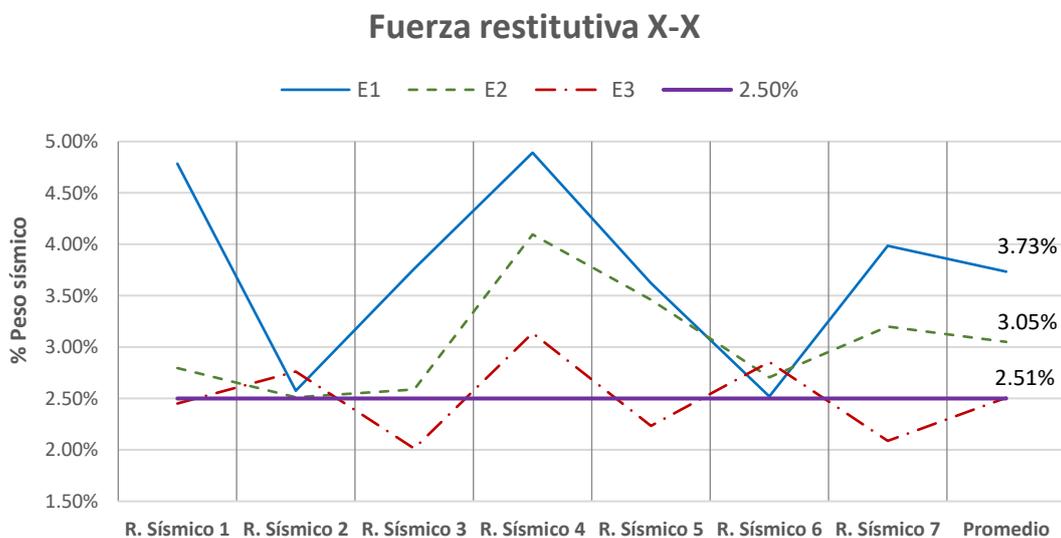
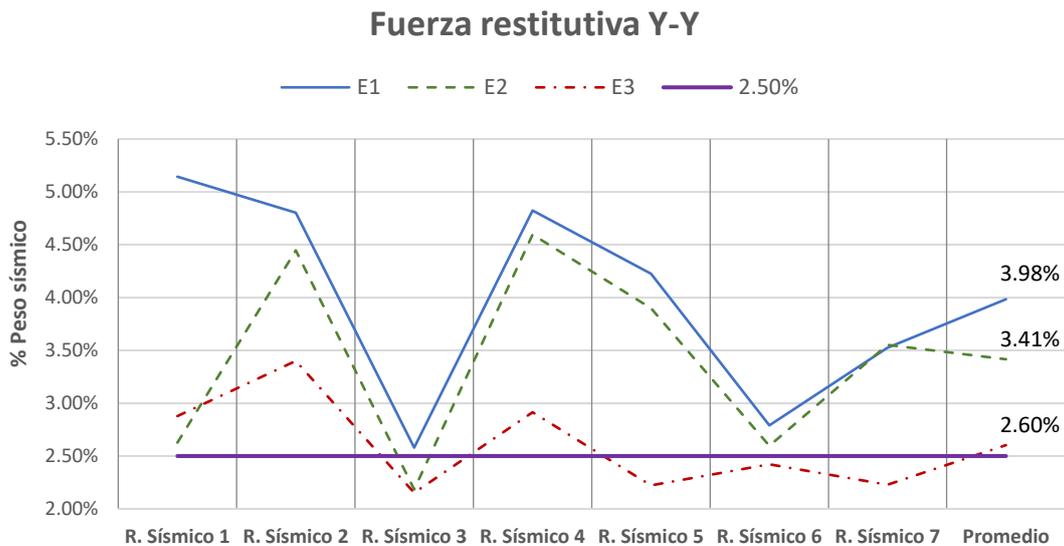


Gráfico 5.14 Fuerzas restititivas (%P) en todas las estructuras Y-Y – Límite inferior



5.3.7 Verificación carga axial en los aisladores

La carga axial en los aisladores varía durante la excitación sísmica o bajo ciertas situaciones, donde estos dispositivos pueden experimentar fuerzas de tracción o levantamiento. La rigidez vertical en tensión de los aisladores es de 1 a 2 % de su rigidez en compresión. Por ello, en el diseño se debe evitar tener la presencia de aisladores traccionados.

La representación del modelo es precisa para la mayoría de aisladores que se encuentra bajo compresión, pero en el caso de los aisladores que presentan tensión los valores pueden estar sobreestimados (*Dynamic Isolation Systems*).

Para el estudio de los elementos traccionados se utilizará elementos links “gap” en los mismos. Estos elementos sólo trabajan a compresión y análisis no lineal, por lo que se le asignará el 99% la rigidez del aislador y el 1% al aislador traccionado. Se tendrá doble elemento que contendrá al aislador con las propiedades modificadas y el link “gap”.

Al realizar el análisis con estos elementos solo en los aisladores traccionados se puede producir una redistribución de cargas, esto implica el aumento los valores de compresión en los dispositivos alejados de los aisladores traccionados y la aparición de nuevos casos de dispositivos en tracción. Por ello, se debe adicionar el elemento link “gap” a los nuevos aisladores hasta que todos los dispositivos traccionados lo contengan. Para el análisis cargas mínimas se utilizará la ecuación (18), los resultados son mostrados en la **Tabla 5.13** y la **Tabla 5.14**.

Tabla 5.13 Cargas mínimas – Aisladores con mayores tracciones y compresiones X-X

X-X	Aislador	R. Sísmico 1	R. Sísmico 2	R. Sísmico 3	R. Sísmico 4	R. Sísmico 5	R. Sísmico 6	R. Sísmico 7	Promedio	
E1	K1	1	2	2	0	2	2	1	1	
	K2	2	2	1	2	2	1	1	2	
	K8	3	3	3	2	2	3	2	3	
	K9	2	2	2	0	2	1	2	1	
	K14	2	1	2	2	2	2	2	2	
	K15	3	3	2	3	3	2	3	3	
	K16	2	2	2	1	2	2	2	2	
	K33	-115	-114	-114	-115	-114	-114	-114	-114	-114
	K34	-116	-116	-116	-117	-116	-116	-116	-116	-116
	K45	-115	-115	-115	-115	-115	-115	-115	-115	-115
E2	K1	-1	0	0	0	0	0	0	0	
	K2	0	0	0	0	0	0	0	0	
	K7	0	0	0	0	0	0	0	0	
	K8	0	0	0	0	0	0	0	0	
	K33	-120	-119	-119	-120	-119	-119	-119	-119	-119
	K34	-121	-121	-121	-121	-121	-121	-121	-121	-121
	K45	-120	-120	-120	-120	-120	-121	-120	-120	-120
E3	K1	-91	-38	-42	1	-43	-14	-28	-36	
	K2	-14	-16	-13	-46	-25	-10	-24	-21	
	K7	-18	-24	-30	-38	-25	-29	-34	-28	
	K8	-10	-5	-17	-8	-16	-23	-15	-14	
	K33	-160	-160	-161	-161	-160	-160	-160	-160	
	K34	-160	-161	-160	-160	-160	-160	-161	-160	
	K45	-160	-160	-160	-160	-160	-160	-160	-160	

* Las celdas de color rojo corresponden a dispositivos debajo de placas

Tabla 5.14 Cargas mínimas – Aisladores con mayores tracciones y compresiones Y-Y

Y-Y	Aislador	R. Sísmico 1	R. Sísmico 2	R. Sísmico 3	R. Sísmico 4	R. Sísmico 5	R. Sísmico 6	R. Sísmico 7	Promedio
E1	K1	2	2	2	2	3	2	2	2
	K2	2	2	2	3	3	2	2	2
	K8	2	2	2	0	1	1	1	1
	K9	2	2	3	1	2	2	2	2
	K14	2	2	3	3	3	3	2	2
	K15	2	2	2	3	2	3	2	2
	K16	2	1	2	0	1	1	2	1
	K33	-115	-115	-115	-117	-115	-115	-116	-116
	K34	-116	-116	-116	-116	-116	-116	-116	-116
	K45	-114	-115	-114	-114	-114	-114	-114	-114
E2	K1	0	0	0	0	0	0	0	0
	K2	0	0	0	0	0	0	0	0
	K7	0	0	0	0	0	0	0	0
	K8	0	0	0	0	0	0	0	0
	K33	-120	-120	-120	-121	-120	-121	-120	-121
	K34	-121	-121	-121	-122	-121	-121	-121	-121
	K45	-119	-120	-119	-119	-119	-119	-119	-119
E3	K1	-2	-7	-22	3	-32	-4	-33	-14
	K2	-11	-15	-8	-34	-21	-21	-10	-17
	K7	-20	-29	-19	-55	-27	-37	-18	-29
	K8	-11	-7	-14	-8	-14	-28	-26	-15
	K33	-161	-160	-161	-161	-161	-161	-161	-161
	K34	-161	-161	-161	-161	-161	-161	-161	-161
	K45	-160	-160	-160	-160	-160	-160	-160	-160

* Las celdas de color rojo corresponden a dispositivos debajo de placas

Levantamientos menores a cinco milímetros en los aisladores son considerados de “Elevación menor”, pueden ser acomodados físicamente por el aislador. Las tracciones presentes en las estructuras corresponden a un levantamiento menor a dos milímetros, no se necesitan detalles especiales para estos valores si se realiza un diseño apropiado (*Dynamic Isolation Systems*).

5.4 Estructura con el sistema híbrido de disipación de energía

El sistema híbrido presente está conformado por la adición de amortiguadores sísmicos al sistema de aislamiento. Esta acción no produce ningún cambio respecto al diseño de

los aisladores ni a los elementos estructurales. La finalidad es saber la variación en cuanto a la respuesta estructural de los dos sistemas ante el mismo evento sísmico.

5.4.1 Estructuras y distribuciones de los amortiguadores

Los amortiguadores sísmicos estarán ubicados en la base del edificio, teniendo una conexión directa con la plataforma de aislamiento. De esta manera se comporta como un sistema unificado y que exista una relación directa entre los dispositivos.

La **Figura 5.11** muestra la vista tridimensional de los modelos híbridos, la **Figura 5.12** muestra planta vista elevación de los sistemas en el eje 3 y la **Figura 5.13** muestra la distribución de los amortiguadores en planta.

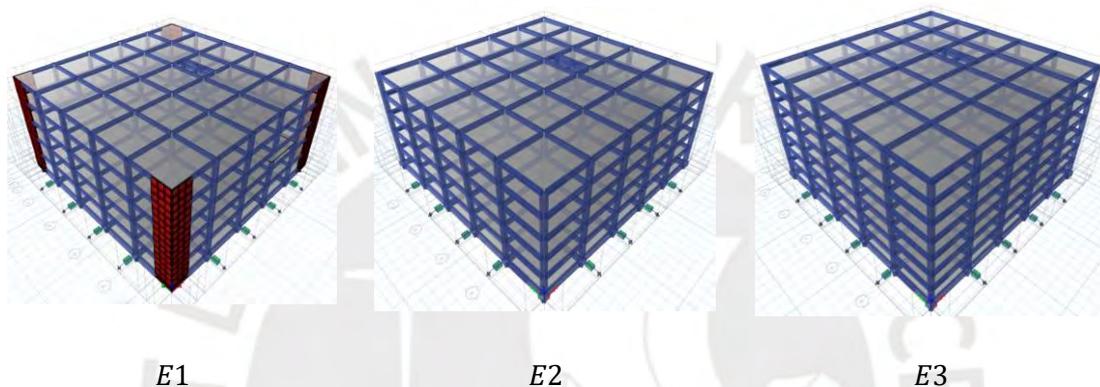


Figura 5.11 Modelo tridimensional de las estructuras híbridas

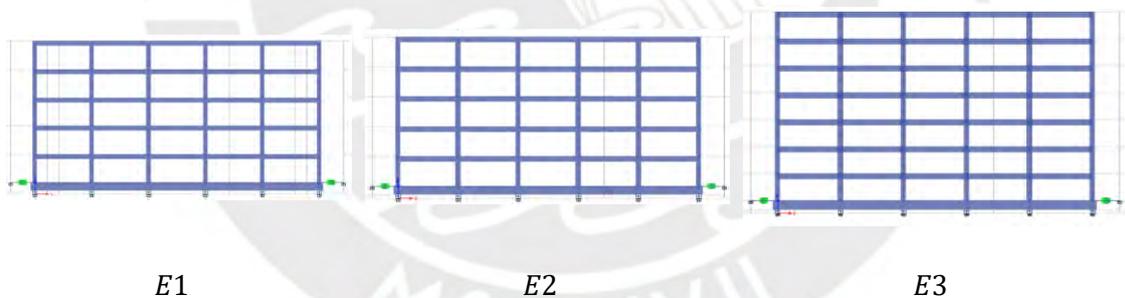


Figura 5.12 Vista elevación de los modelos híbridos – Eje 3

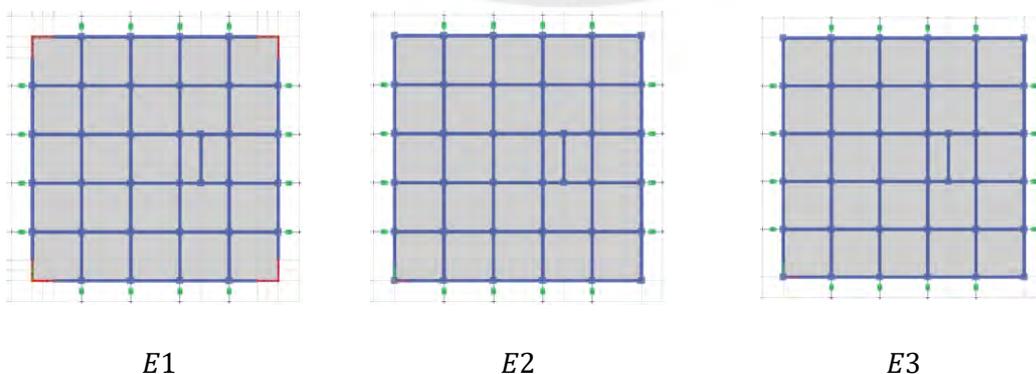


Figura 5.13 Distribución de los amortiguadores de fluido viscoso

Brazo rígido: Para fines de cálculos matemáticos la elección de la rigidez del brazo metálico influirá en los resultados. La deformación obtenida por el programa, en el presente proyecto es *ETABS 2018*, es producto de la acumulación de las deformaciones del amortiguador de fluido viscoso y del brazo metálico.

Para evitar este problema se seguirá las recomendaciones dadas por la **Tabla 5.15** eligiendo como valor de diseño el modelo 17120 dada para una fuerza de 250 kN o 25.5 ton y la rigidez efectiva del brazo metálico de 11161 ton/m .

Tabla 5.15 Propiedades del perfil metálico

Fuerza (ton)	Número de modelo Taylor Devices	Rigidez efectiva del Brazo Rígido "K" (ton/m)
25.5	17120	11161
51	17130	16787
76.5	17140	25002
102	17150	33484
153	17160	50003
204	17170	53575
306	17180	85720
408	17190	107150
663	17200	174118
816	17210	214299

Adaptado de (Taylor Devices, 2020)

5.4.2 Cálculo del coeficiente de amortiguamiento "C"

De acuerdo a lo exployado en el acápite 4.2.2 para calcular el coeficiente de amortiguamiento C se realizará un análisis de datos comprendido para distintos valores del coeficiente de amortiguación y así hallar el valor óptimo. El análisis comprende de valores de C de 10 a $50 \frac{ton*s}{m}$, estos datos corresponden para cada amortiguador y se cuentan con total de 16 amortiguadores de fluido viscoso en la estructura.

Se realizará el modelamiento para dos coeficientes de velocidad (α), los valores escogidos para el análisis serán de 0.15 y 0.5. Para el modelamiento se añadirán los amortiguadores de manera directa al sistema aislado, no se realizará cambios en las propiedades de los aisladores sísmicos. Los parámetros usados corresponden a los descritos en el inciso 4.2.2.1 para la eficiencia (E).

Deriva (Dr): Se mostrará la relación entre la deriva del sistema híbrido y la del sistema aislado. Fuerza (F): Se mostrará la relación de la fuerza en el sistema híbrido respecto al sistema aislado. Desplazamiento (D): Se mostrará el porcentaje de reducción del desplazamiento en la base del sistema híbrido respecto al sistema aislado.

Los siguientes gráficos representan los valores promedios, para cada dato del coeficiente de velocidad α , de las variables descritas respecto a la amortiguación otorgada para cada dispositivo. El **Anexo J** contiene estos valores por cada registro

sísmico en un análisis Tiempo-Historia. Se considera el análisis de todas las señales sísmicas en las direcciones X e Y.

El **Gráfico 5.15** muestra la variación del porcentaje de reducción del desplazamiento en la base del edificio del sistema híbrido respecto al sistema aislado en la estructura E1.

El **Gráfico 5.16** detalla la relación de derivas y el **Gráfico 5.17** de fuerzas basales del sistema híbrido respecto al sistema aislado en la estructura E1.

Gráfico 5.15 Reducción promedio de desplazamiento en la base E1

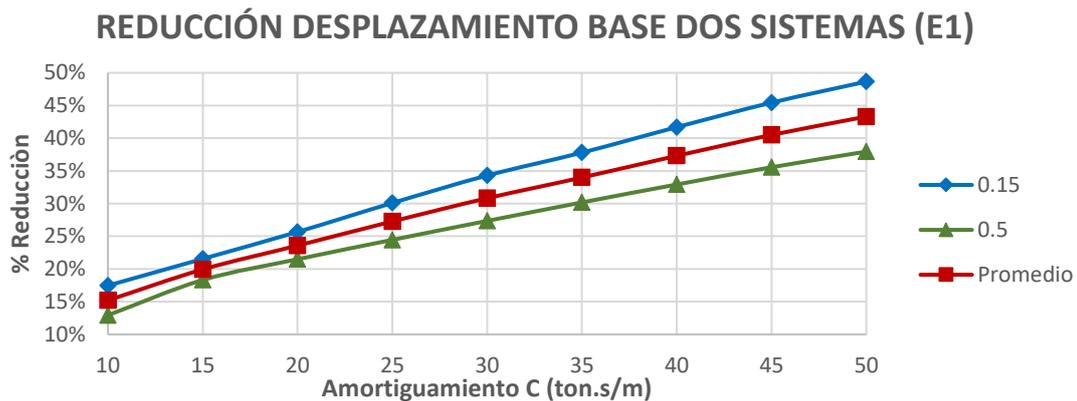


Gráfico 5.16 Relación promedio de derivas E1

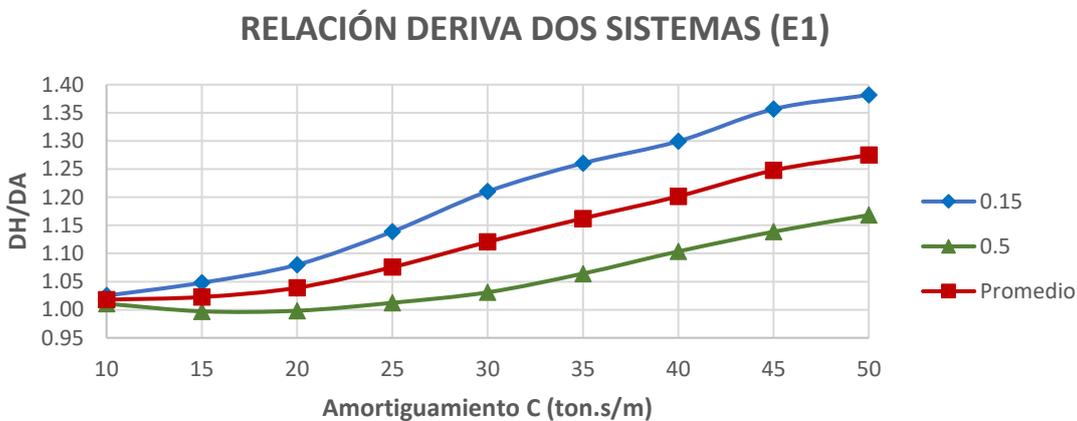
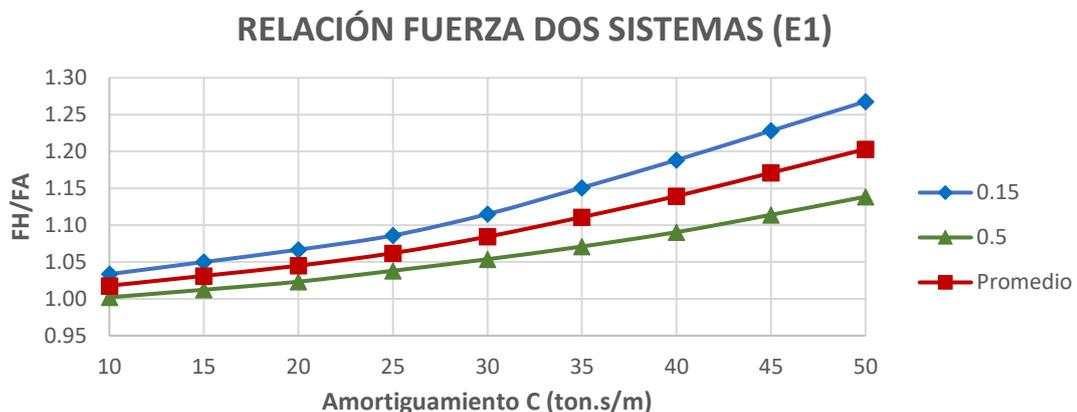


Gráfico 5.17 Relación promedio de fuerza basal E1



El **Gráfico 5.18** muestra la variación del porcentaje de reducción del desplazamiento en la base del edificio del sistema híbrido respecto al sistema aislado en la estructura *E2*. El **Gráfico 5.19** muestra la relación de derivas sistema híbrido respecto al sistema aislado y el **Gráfico 5. 20** de fuerzas basales ambos en la estructura *E2*.

Gráfico 5.18 Reducción promedio de desplazamiento en la base E2

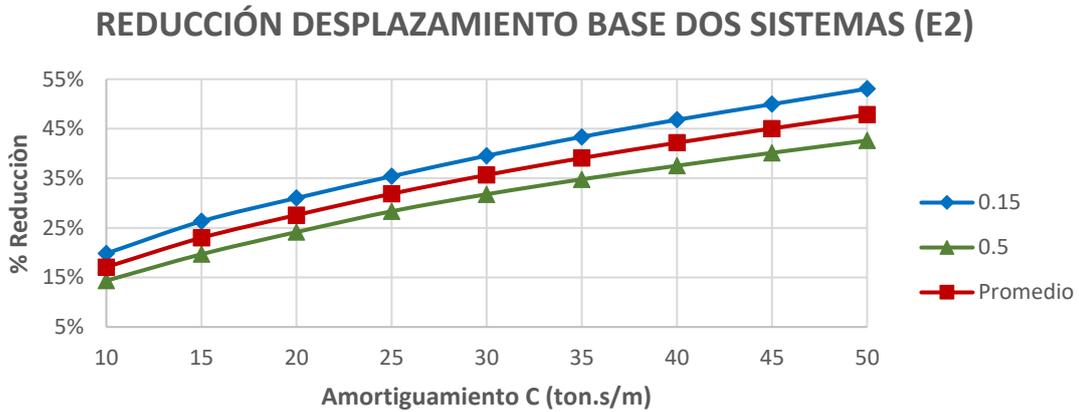


Gráfico 5.19 Relación promedio de derivas E2

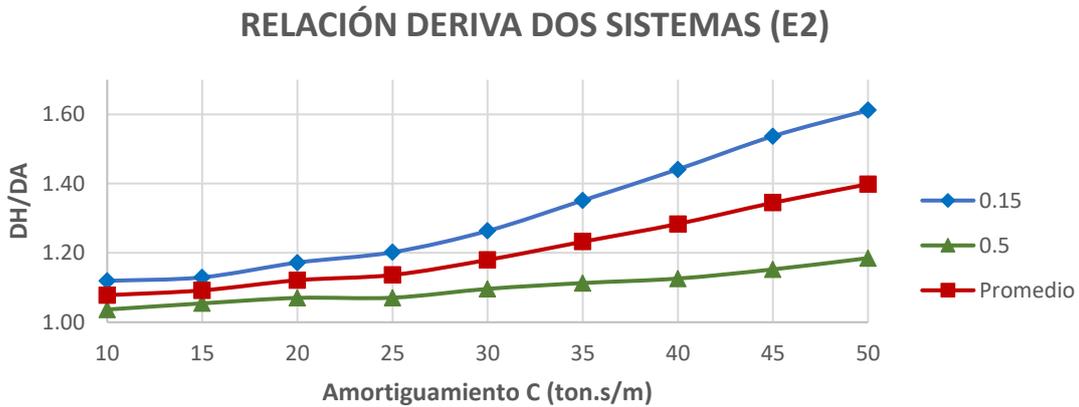
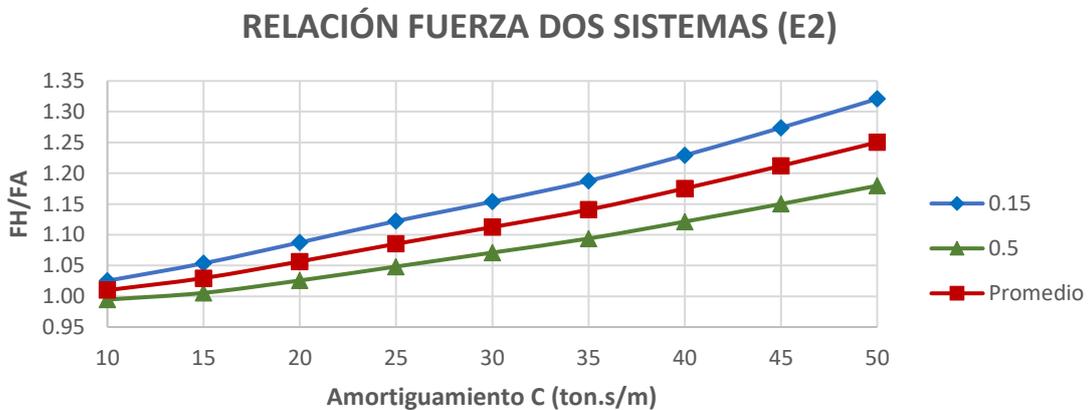


Gráfico 5. 20 Relación promedio de fuerza basal E2



El **Gráfico 5.21** muestra la variación del porcentaje de reducción del desplazamiento en la base del edificio del sistema híbrido respecto al sistema aislado en la estructura *E3*. El **Gráfico 5.22** muestra la relación de derivas sistema híbrido respecto al sistema aislado y el **Gráfico 5.23** de fuerzas basales ambos en la estructura *E3*.

Gráfico 5.21 Reducción promedio de desplazamiento en la base E3

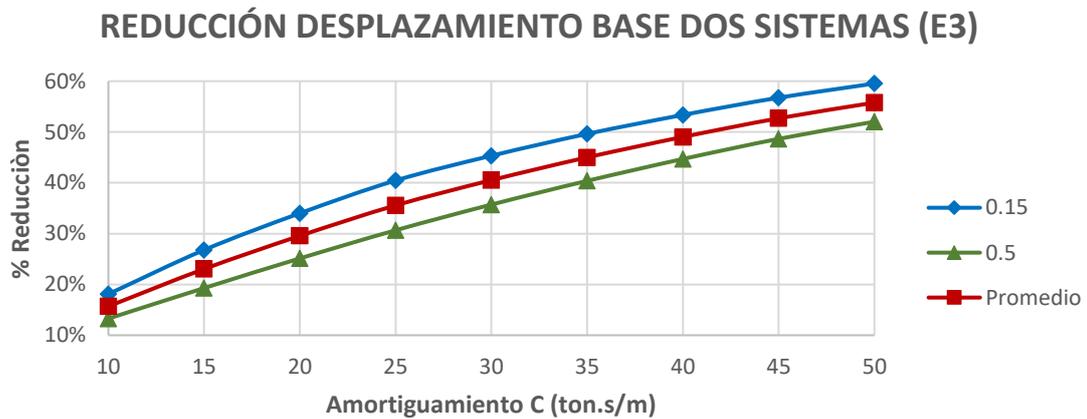


Gráfico 5.22 Relación promedio de derivas E3

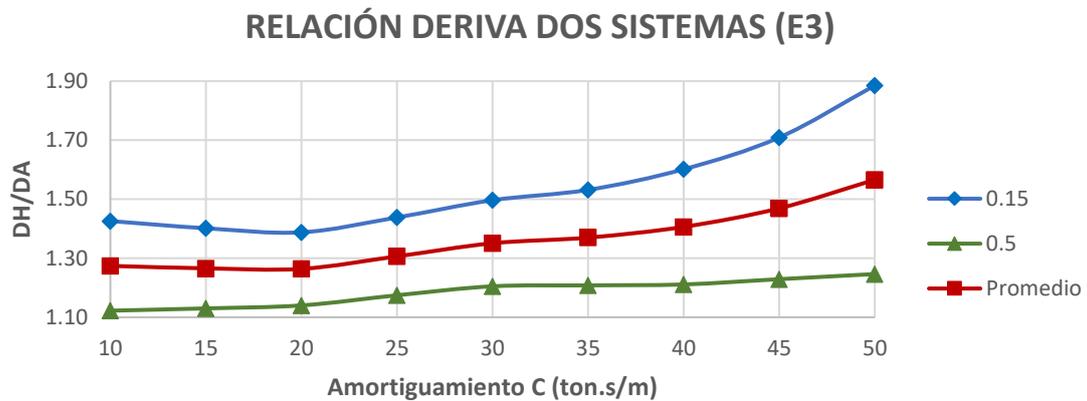
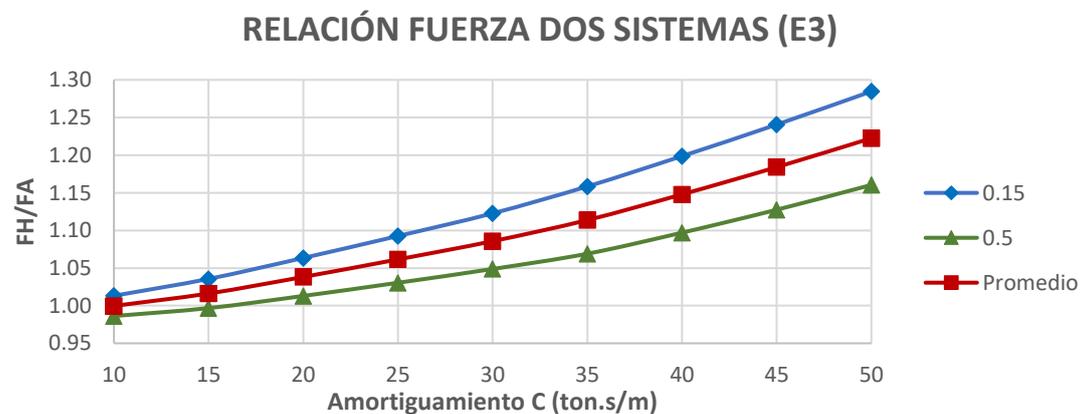


Gráfico 5.23 Relación promedio de fuerza basal E3



Todos los gráficos presentan una tendencia ascendente, las variables definidas aumentan en relación directa con el amortiguamiento otorgado. Al realizar la comparación de los sistemas respecto al coeficiente de velocidad se observa que: para $\alpha = 0.15$ se presentan mayores valores de reducción de desplazamiento con un mayor sacrificio del desempeño que implica aumento en derivas y fuerzas basales.

Respecto a la comparación de estructuras se identifica que existe una mayor reducción de desplazamientos para estructuras más flexibles, de igual manera sucede en el aumento de derivas y fuerzas basales.

Para definir el valor de amortiguamiento adecuado para el diseño se presentarán los análisis de eficiencias promedio en el **Gráfico 5.24**, el **Gráfico 5.25** y el **Gráfico 5.26** correspondientes a las estructuras *E1*, *E2* y *E3* respectivamente.

Gráfico 5.24 Eficiencia promedio sistemas $\alpha = 0.15$ y 0.5 E1

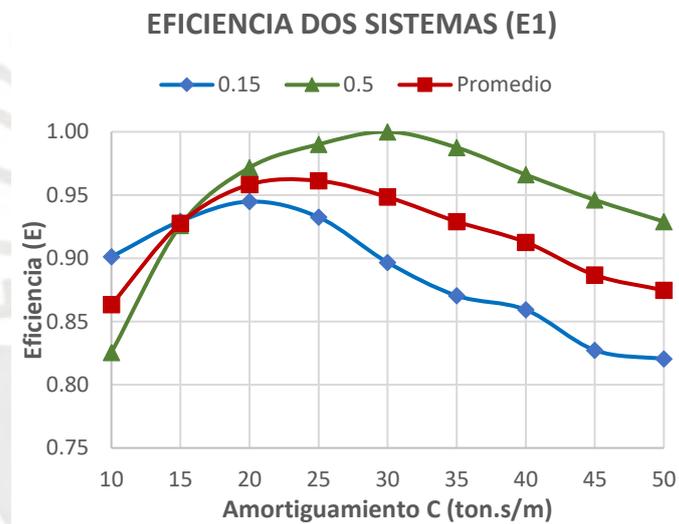


Gráfico 5.25 Eficiencia promedio sistemas $\alpha = 0.15$ y 0.5 E2

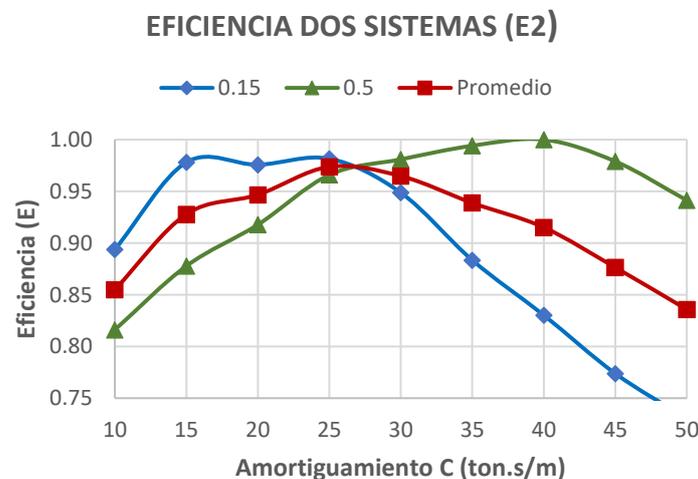
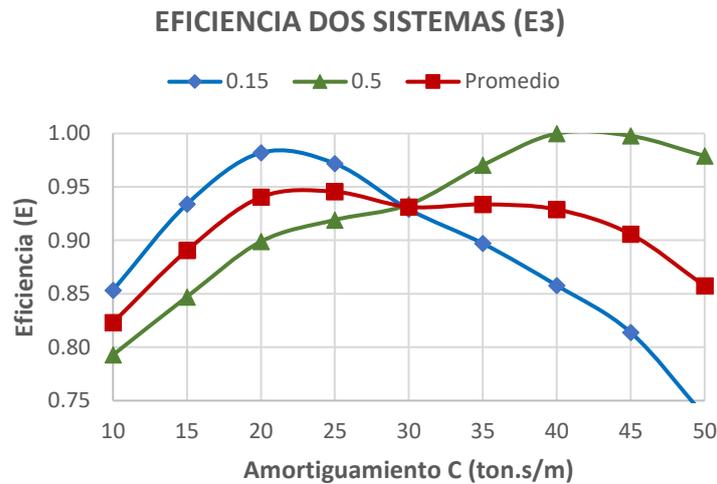


Gráfico 5.26 Eficiencia promedio sistemas $\alpha = 0.15$ y 0.5 E3



Los valores picos representan un mejor funcionamiento relacionado con el coeficiente de amortiguación, estos resultados son independientes cuando se usa coeficiente de velocidad distinto en una misma estructura.

Los puntos de intersección de las gráficas representan los valores de igual eficiencia para los sistemas de $\alpha = 0.15$ y 0.5 , las estructuras más flexibles presentan estas zonas a mayores valores de amortiguación. De manera práctica se tomará el valor de coeficiente de amortiguación del gráfico promedio, este valor es $C = 25 \frac{\text{ton}\cdot\text{s}}{\text{m}}$ por cada amortiguador y de $C_{global} = 400 \frac{\text{ton}\cdot\text{s}}{\text{m}}$ para la estructura completa.

5.4.3 Resultados modales

A pesar de que el sistema híbrido presenta reducción en la flexibilización de la estructura no presenta variación de los resultados modales, independiente del valor de coeficiente de velocidad y de amortiguamiento, respecto a la estructura aislada.

CAPÍTULO VI: ANÁLISIS DE RESULTADOS

Se presentará los resultados en términos de comparaciones de los sistemas híbridos respecto a los aislados.

6.1 Concentración de vibración en un solo modo

Se cumple en todos los casos la recomendación de que casi la totalidad de la masa participativa se concentra en los tres primeros modos de vibración, la implementación de los amortiguadores en el sistema híbrido no hace que esta proporción disminuya.

El **Gráfico 6.1** muestra el porcentaje de masa participativa acumulada para el tercer modo en los modelos de base fija. En el caso de el **Gráfico 6.2**, el **Gráfico 6.3** y el **Gráfico 6.4** representan los valores de masa participativa acumulada en los sistemas aislado e híbrido para su respectivo diseño.

Gráfico 6.1 Masa participante acumulada en el tercer modo – Base fija

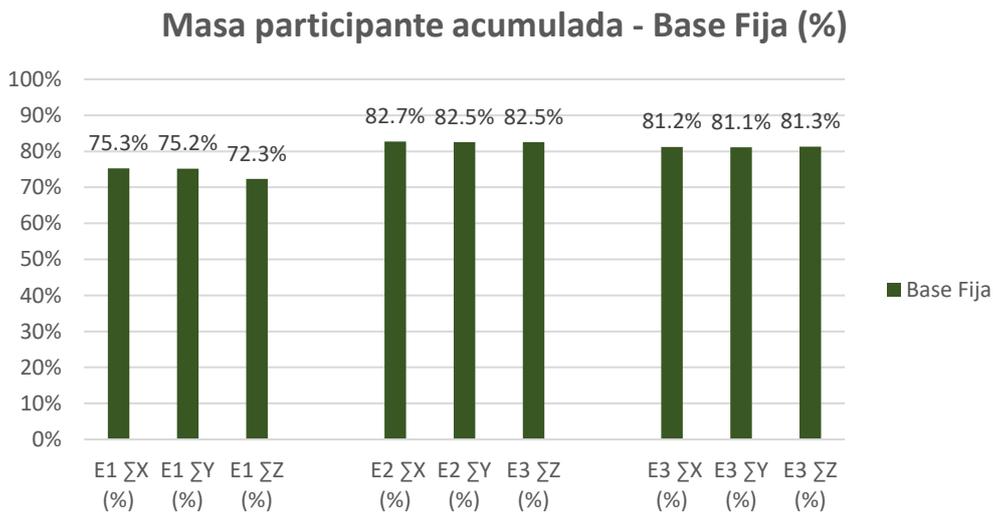


Gráfico 6.2 Masa participante acumulada en el tercer modo – Diseño nominal

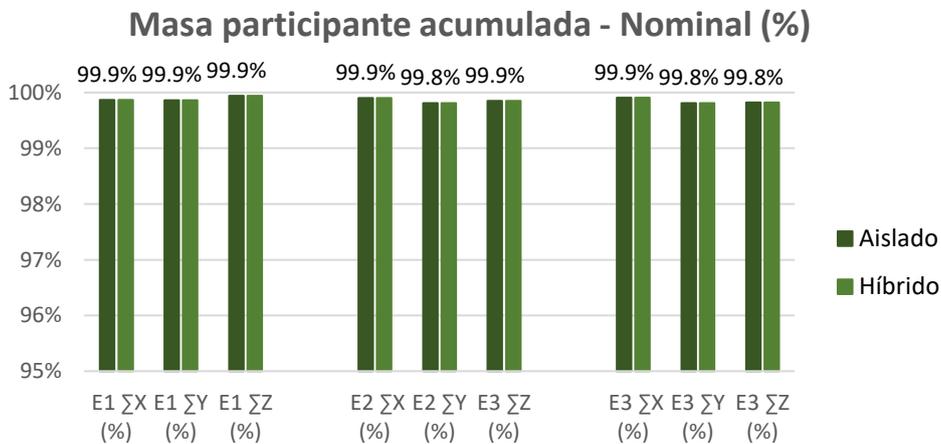


Gráfico 6.3 Masa participante acumulada en el tercer modo – Límite superior

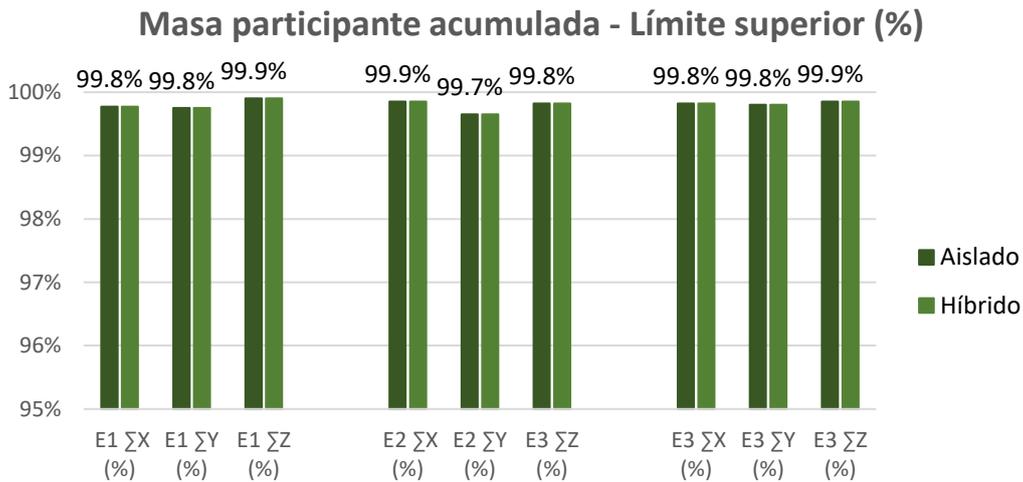
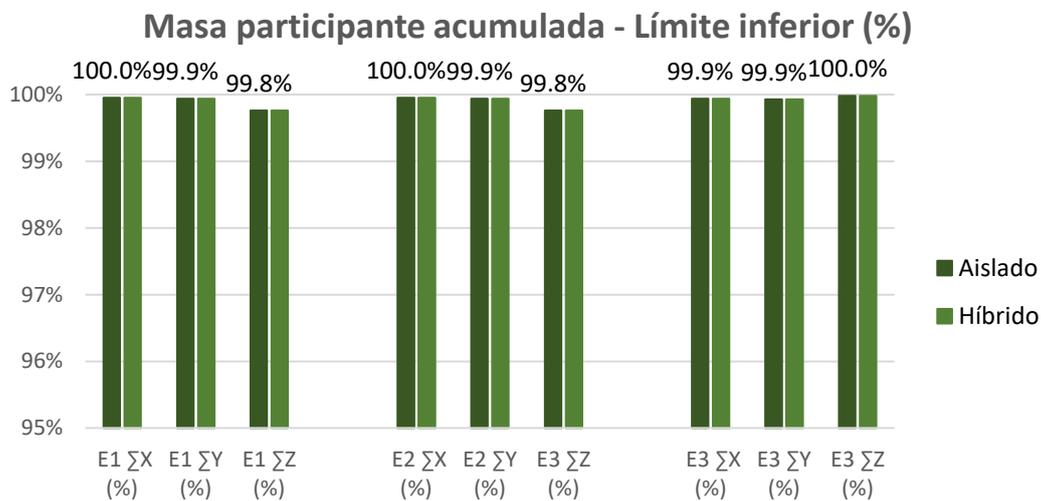


Gráfico 6.4 Masa participante acumulada en el tercer modo – Límite inferior



La relación entre los periodos aislados e híbridos respecto a la estructura de base fija son mayores a 3.

6.2 Análisis de derivas

Los datos que se presentarán a continuación corresponden al análisis Tiempo-Historia, la finalidad es poder realizar la comparación con el sistema híbrido.

6.2.1 Resultados en el sistema aislado

La **Tabla 6.1** y la **Tabla 6.2** muestran los valores de derivas inelásticas obtenidos en el análisis no lineal Tiempo-Historia para el sistema aislado con el diseño de límite superior en la estructura *E1*.

Tabla 6.1 Derivas inelásticas Sistema Aislado X-X – Límite superior – E1

NIVEL	DERIVAS SISTEMA AISLADO EJE X-X (‰) Límite superior - E1						
	R. Sísmico 1	R. Sísmico 2	R. Sísmico 3	R. Sísmico 4	R. Sísmico 5	R. Sísmico 6	R. Sísmico 7
5	1.15	1.89	1.85	1.25	1.38	1.18	0.73
4	1.18	2.02	2.06	1.45	1.59	1.33	0.85
3	1.14	1.78	2.05	1.53	1.65	1.38	0.95
2	1.40	1.68	2.45	1.95	1.98	1.78	1.33
1	1.33	1.42	2.22	1.86	1.74	1.73	1.38

Tabla 6.2 Derivas inelásticas Sistema Aislado Y-Y – Límite superior – E1

NIVEL	DERIVAS SISTEMA AISLADO EJE Y-Y (‰) Límite superior - E1						
	R. Sísmico 1	R. Sísmico 2	R. Sísmico 3	R. Sísmico 4	R. Sísmico 5	R. Sísmico 6	R. Sísmico 7
5	1.05	1.89	1.85	1.32	1.78	1.31	1.07
4	1.21	2.02	2.06	1.51	1.78	1.47	1.22
3	1.31	1.78	2.05	1.59	1.61	1.44	1.32
2	1.72	1.68	2.45	2.03	1.84	1.74	1.80
1	1.70	1.42	2.22	1.94	1.65	1.42	1.80

Los datos del análisis otorgan valores máximos de derivas de 2.45‰ para las direcciones X e Y, estos valores son menores al rango recomendado. El valor promedio mayor, correspondiente al segundo nivel, de las derivas de los 7 registros sísmicos otorgan resultados de 1.79‰ y 1.89‰.

La **Tabla 6.3** y la **Tabla 6.4** muestran los valores de derivas inelásticas obtenidos en el análisis no lineal Tiempo-Historia para el sistema aislado con el diseño de límite superior en la estructura E2.

Tabla 6.3 Derivas inelásticas Sistema Aislado X-X – Límite superior – E2

NIVEL	DERIVAS SISTEMA AISLADO EJE X-X (‰) Límite superior - E2						
	R. Sísmico 1	R. Sísmico 2	R. Sísmico 3	R. Sísmico 4	R. Sísmico 5	R. Sísmico 6	R. Sísmico 7
5	0.81	0.86	0.27	0.72	0.88	0.45	0.99
4	1.37	1.58	0.60	1.34	1.58	0.69	1.76
3	1.83	2.17	1.10	1.95	2.16	0.65	2.34
2	2.22	2.40	1.72	2.42	2.52	1.00	2.57
1	1.84	1.78	1.70	2.07	2.05	1.25	2.00

Tabla 6.4 Derivas inelásticas Sistema Aislado Y-Y – Límite superior – E2

NIVEL	DERIVAS SISTEMA AISLADO EJE Y-Y (‰) Límite superior - E2						
	R. Sísmico 1	R. Sísmico 2	R. Sísmico 3	R. Sísmico 4	R. Sísmico 5	R. Sísmico 6	R. Sísmico 7
5	0.74	0.54	0.27	0.84	0.88	1.13	0.93
4	1.44	0.93	0.60	1.55	1.58	1.93	1.71
3	2.16	1.44	1.10	2.23	2.16	2.43	2.40
2	2.72	1.89	1.72	2.70	2.52	2.49	2.87
1	2.26	1.53	1.70	2.24	2.05	1.83	2.31

Los datos del análisis otorgan valores máximos de derivas de 2.42‰ y 2.70‰, correspondientes a los análisis en el eje X e Y respectivamente. Los valores promedios mayores referidos al segundo nivel son 2.12‰ y 2.42‰.

La **Tabla 6.5** y la **Tabla 6.6** muestran los valores de derivas inelásticas obtenidos en el análisis no lineal Tiempo-Historia para el sistema aislado con el diseño de límite superior en la estructura E3.

Tabla 6.5 Derivas inelásticas Sistema Aislado X-X – Límite superior – E3

NIVEL	DERIVAS SISTEMA AISLADO EJE X-X (%) Límite superior - E3						
	R. Sísmico 1	R. Sísmico 2	R. Sísmico 3	R. Sísmico 4	R. Sísmico 5	R. Sísmico 6	R. Sísmico 7
7	0.33	0.69	0.34	0.33	0.34	0.37	0.37
6	0.64	1.23	0.64	0.60	0.56	0.64	0.66
5	0.96	1.68	0.98	0.91	0.79	0.75	0.93
4	1.21	1.97	1.29	1.21	1.01	0.46	1.17
3	1.48	2.20	1.29	1.55	1.33	0.55	1.45
2	1.66	2.04	1.43	1.79	1.58	0.95	1.67
1	1.18	1.35	1.10	1.39	1.17	0.95	1.30

Tabla 6.6 Derivas inelásticas Sistema Aislado X-X – Límite superior – E3

NIVEL	DERIVAS SISTEMA AISLADO EJE Y-Y (%) Límite superior - E3						
	R. Sísmico 1	R. Sísmico 2	R. Sísmico 3	R. Sísmico 4	R. Sísmico 5	R. Sísmico 6	R. Sísmico 7
7	0.44	0.18	0.78	0.32	0.70	0.19	0.02
6	0.80	0.41	1.41	0.60	1.25	0.24	0.03
5	0.36	0.72	1.98	0.91	1.75	0.37	0.19
4	0.48	1.07	2.36	1.21	1.58	0.61	0.46
3	0.96	1.50	2.38	1.56	1.29	0.98	0.91
2	1.39	1.82	1.60	1.84	1.55	1.33	1.40
1	1.20	1.42	1.07	1.45	1.24	1.12	1.25

Los datos del análisis otorgan valores máximos de derivas de 2.20‰ y 2.38‰, correspondientes a los análisis en el eje X e Y respectivamente. Los valores promedios mayores referidos al segundo nivel son 1.58‰ y 1.59‰.

6.2.2 Resultados en el sistema híbrido

Se presentarán datos correspondientes a la estructura E1 con el diseño del límite superior y el valor de $C = 25 \frac{\text{ton}\cdot\text{s}}{\text{m}}$ para cada disipador de fluido viscoso. La **Tabla 6.7** y la **Tabla 6.8** muestran los valores de derivas para el sistema híbrido de $\alpha = 0.15$; la **Tabla 6.9** y la **Tabla 6.10** corresponden al sistema híbrido de $\alpha = 0.5$.

Tabla 6.7 Derivas inelásticas Sistema Híbrido X-X $\alpha=0.15$ – Límite superior – E1

NIVEL	DERIVAS SISTEMA HIBRIDO EJE X-X (%) Límite superior $\alpha=0.15$ - E1						
	R. Sísmico 1	R. Sísmico 2	R. Sísmico 3	R. Sísmico 4	R. Sísmico 5	R. Sísmico 6	R. Sísmico 7
5	1.24	2.10	1.82	1.35	0.94	1.39	1.06
4	1.42	2.30	2.05	1.58	1.12	1.54	1.17
3	1.47	2.21	2.05	1.66	1.25	1.59	1.18
2	1.67	2.55	2.48	1.96	1.69	2.10	1.52
1	1.21	2.20	2.23	1.72	1.65	2.06	1.12

Tabla 6.8 Derivas inelásticas Sistema Híbrido Y-Y $\alpha=0.15$ – Límite superior – E1

NIVEL	DERIVAS SISTEMA HIBRIDO EJE Y-Y (‰) Límite superior $\alpha=0.15$ - E1						
	R. Sísmico 1	R. Sísmico 2	R. Sísmico 3	R. Sísmico 4	R. Sísmico 5	R. Sísmico 6	R. Sísmico 7
5	1.61	2.10	1.82	1.43	2.27	1.71	1.61
4	1.40	2.30	2.05	1.63	2.53	1.95	1.78
3	1.11	2.21	2.05	1.71	2.16	1.97	1.80
2	1.53	2.55	2.48	2.04	2.29	1.82	2.29
1	1.55	2.20	2.23	1.80	2.00	1.44	2.17

Tabla 6.9 Derivas inelásticas Sistema Híbrido X-X $\alpha=0.5$ – Límite superior – E1

NIVEL	DERIVAS SISTEMA HIBRIDO EJE X-X (‰) Límite superior $\alpha=0.5$ - E1						
	R. Sísmico 1	R. Sísmico 2	R. Sísmico 3	R. Sísmico 4	R. Sísmico 5	R. Sísmico 6	R. Sísmico 7
5	0.91	2.07	1.63	1.19	1.19	1.18	1.16
4	0.95	2.26	1.85	1.35	1.38	1.31	0.70
3	0.93	2.07	1.87	1.39	1.45	1.33	0.78
2	1.22	2.19	2.30	1.74	1.85	1.75	1.10
1	1.23	1.70	2.12	1.64	1.74	1.72	1.13

Tabla 6.10 Derivas inelásticas Sistema Híbrido Y-Y $\alpha=0.5$ – Límite superior – E1

NIVEL	DERIVAS SISTEMA HIBRIDO EJE Y-Y (‰) Límite superior $\alpha=0.5$ - E1						
	R. Sísmico 1	R. Sísmico 2	R. Sísmico 3	R. Sísmico 4	R. Sísmico 5	R. Sísmico 6	R. Sísmico 7
5	0.78	2.07	1.63	1.25	2.13	1.71	1.51
4	0.93	2.26	1.85	1.40	2.18	1.97	1.70
3	1.07	2.07	1.87	1.44	1.90	1.81	1.77
2	1.48	2.19	2.30	1.81	2.10	1.46	2.27
1	1.49	1.70	2.12	1.70	1.81	1.35	2.16

El sistema híbrido presenta incrementos en las derivas, los valores máximos en el sistema $\alpha = 0.15$ son 2.48 ‰ y 2.55 ‰, para el sistema $\alpha = 0.5$ son 2.27 ‰ y 2.30 ‰. Los valores promedios máximos referidos al segundo nivel en el sistema $\alpha = 0.15$ son 1.99 ‰ y 2.14 ‰, para el sistema $\alpha = 0.5$ son 1.73 ‰ y 1.94 ‰. Se mantiene el mismo desempeño respecto al sistema aislado.

La **Tabla 6.11** y la **Tabla 6.12** muestran los valores de derivas para el sistema híbrido de $\alpha = 0.15$; la **Tabla 6.13** y la **Tabla 6.14** corresponden al sistema híbrido de $\alpha = 0.5$. Resultados referidos a la estructura E2 con el diseño del límite superior y el valor del coeficiente de amortiguamiento $C = 25 \frac{\text{ton}\cdot\text{s}}{\text{m}}$ para cada disipador de fluido viscoso.

Tabla 6.11 Derivas inelásticas Sistema Híbrido X-X $\alpha=0.15$ – Límite superior – E2

NIVEL	DERIVAS SISTEMA HIBRIDO EJE X-X (‰) Límite superior $\alpha=0.15$ - E2						
	R. Sísmico 1	R. Sísmico 2	R. Sísmico 3	R. Sísmico 4	R. Sísmico 5	R. Sísmico 6	R. Sísmico 7
5	0.86	1.27	0.64	1.05	0.81	0.56	0.61
4	0.46	2.33	1.09	1.73	1.44	0.66	1.15
3	0.49	3.11	1.54	2.18	2.00	0.95	1.76
2	1.30	2.72	2.09	2.46	2.48	1.63	2.34
1	1.50	1.85	1.89	1.99	2.02	1.76	1.91

Tabla 6.12 Derivas inelásticas Sistema Híbrido Y-Y $\alpha=0.15$ – Límite superior – E2

NIVEL	DERIVAS SISTEMA HIBRIDO EJE Y-Y (‰) Límite superior $\alpha=0.15$ - E2						
	R. Sísmico 1	R. Sísmico 2	R. Sísmico 3	R. Sísmico 4	R. Sísmico 5	R. Sísmico 6	R. Sísmico 7
5	0.61	1.27	0.64	1.16	1.91	1.52	0.96
4	1.25	2.33	1.09	1.90	3.25	2.11	0.80
3	1.95	3.11	1.54	2.40	4.10	2.21	1.41
2	2.59	2.72	2.09	2.70	4.27	2.50	2.48
1	2.17	1.85	1.89	2.10	1.54	1.87	2.24

Tabla 6.13 Derivas inelásticas Sistema Híbrido X-X $\alpha=0.5$ – Límite superior – E2

NIVEL	DERIVAS SISTEMA HIBRIDO EJE X-X (‰) Límite superior $\alpha=0.5$ - E2						
	R. Sísmico 1	R. Sísmico 2	R. Sísmico 3	R. Sísmico 4	R. Sísmico 5	R. Sísmico 6	R. Sísmico 7
5	0.62	1.31	0.54	0.78	0.82	0.36	0.83
4	0.88	2.33	1.00	1.40	1.49	0.40	1.13
3	1.11	3.13	1.49	1.90	2.04	0.65	1.75
2	1.30	2.86	2.03	2.05	2.44	1.26	2.20
1	1.39	1.50	1.83	1.78	1.99	1.46	1.78

Tabla 6.14 Derivas inelásticas Sistema Híbrido Y-Y $\alpha=0.5$ – Límite superior – E2

NIVEL	DERIVAS SISTEMA HIBRIDO EJE Y-Y (‰) Límite superior $\alpha=0.5$ - E2						
	R. Sísmico 1	R. Sísmico 2	R. Sísmico 3	R. Sísmico 4	R. Sísmico 5	R. Sísmico 6	R. Sísmico 7
5	0.54	1.31	0.54	0.82	1.69	1.33	0.40
4	1.17	2.33	1.00	1.46	2.85	2.01	1.05
3	1.90	3.13	1.49	1.89	2.91	2.32	1.83
2	2.55	2.86	2.03	2.25	2.44	2.42	2.50
1	2.15	1.50	1.83	1.91	1.89	1.79	2.15

El sistema híbrido presenta incrementos en las derivas, se tiene valores máximos en el sistema $\alpha = 0.15$ de 3.11 ‰ y 4.27 ‰, para el sistema $\alpha = 0.5$ de 3.13 ‰ y 2.91 ‰. Los valores promedios máximos referidos al segundo nivel en el sistema $\alpha = 0.15$ son 2.15 ‰ y 2.76 ‰, para el sistema $\alpha = 0.5$ son 2.14 ‰ y 2.42 ‰. Se mantiene el mismo desempeño respecto al sistema aislado.

La **Tabla 6.15** y la **Tabla 6.16** muestran los valores de derivas para el sistema híbrido de $\alpha = 0.15$; la **Tabla 6.17** y la **Tabla 6.18** corresponden al sistema híbrido de $\alpha = 0.5$. Resultados referidos a la estructura E2 con el diseño del límite superior y el valor del coeficiente de amortiguamiento $C = 25 \frac{\text{ton}\cdot\text{s}}{\text{m}}$ para cada disipador de fluido viscoso.

Tabla 6.15 Derivas inelásticas Sistema Híbrido X-X $\alpha=0.15$ – Límite superior – E3

NIVEL	DERIVAS SISTEMA HIBRIDO EJE X-X (‰) Límite superior $\alpha=0.15$ - E3						
	R. Sísmico 1	R. Sísmico 2	R. Sísmico 3	R. Sísmico 4	R. Sísmico 5	R. Sísmico 6	R. Sísmico 7
7	0.76	0.64	0.71	0.45	0.62	0.35	0.55
6	1.31	1.15	1.22	0.82	1.12	0.41	0.93
5	1.84	1.69	1.62	1.19	1.57	0.32	1.26
4	2.26	2.21	1.92	1.53	1.89	0.34	1.51
3	2.48	2.63	2.33	1.94	1.81	0.81	1.82
2	2.26	2.44	2.56	2.22	1.65	1.37	2.11
1	1.58	1.43	1.76	1.61	1.25	1.20	1.54

Tabla 6.16 Derivas inelásticas Sistema Híbrido Y-Y $\alpha=0.15$ – Límite superior – E3

NIVEL	DERIVAS SISTEMA HIBRIDO EJE Y-Y (‰) Límite superior $\alpha=0.15$ - E3						
	R. Sísmico 1	R. Sísmico 2	R. Sísmico 3	R. Sísmico 4	R. Sísmico 5	R. Sísmico 6	R. Sísmico 7
7	0.49	0.34	1.10	0.46	1.12	0.26	0.45
6	0.98	0.71	1.86	0.84	0.93	0.33	0.81
5	1.51	1.11	2.46	1.23	0.98	0.43	1.19
4	1.97	1.45	3.05	1.60	1.36	0.65	1.50
3	2.46	1.86	3.76	2.03	1.89	1.13	1.91
2	2.73	2.14	3.71	2.31	2.31	1.66	2.25
1	1.90	1.50	2.83	1.66	1.66	1.32	1.68

Tabla 6.17 Derivas inelásticas Sistema Híbrido X-X $\alpha=0.5$ – Límite superior – E3

NIVEL	DERIVAS SISTEMA HIBRIDO EJE X-X (‰) Límite superior $\alpha=0.5$ - E3						
	R. Sísmico 1	R. Sísmico 2	R. Sísmico 3	R. Sísmico 4	R. Sísmico 5	R. Sísmico 6	R. Sísmico 7
7	0.52	0.65	0.57	0.31	0.25	0.27	0.37
6	0.92	1.07	1.02	0.62	0.58	0.48	0.71
5	1.20	1.07	1.43	0.99	0.93	0.63	1.06
4	1.25	1.30	1.75	1.35	1.24	0.69	1.37
3	1.44	1.63	2.08	1.73	1.30	0.86	1.69
2	1.68	1.84	2.22	1.96	1.37	1.11	1.92
1	1.26	1.32	1.52	1.44	1.06	0.98	1.41

Tabla 6.18 Derivas inelásticas Sistema Híbrido Y-Y $\alpha=0.5$ – Límite superior – E3

NIVEL	DERIVAS SISTEMA HIBRIDO EJE Y-Y (‰) Límite superior $\alpha=0.5$ - E3						
	R. Sísmico 1	R. Sísmico 2	R. Sísmico 3	R. Sísmico 4	R. Sísmico 5	R. Sísmico 6	R. Sísmico 7
7	0.23	0.27	0.72	0.32	0.44	0.22	0.11
6	0.55	0.62	1.21	0.64	0.84	0.28	0.28
5	0.98	1.00	1.75	1.02	1.22	0.38	0.49
4	1.45	1.31	2.21	1.39	1.56	0.61	0.78
3	1.99	1.68	2.82	1.78	1.99	1.04	1.23
2	2.30	1.94	3.30	2.03	2.26	1.49	1.69
1	1.63	1.38	2.17	1.49	1.54	1.24	1.37

El sistema híbrido presenta incrementos en las derivas, se tiene valores máximos en el sistema $\alpha = 0.15$ de 2.63 ‰ y 2.83 ‰, para el sistema $\alpha = 0.5$ de 2.22 ‰ y 3.30 ‰. Los valores promedios máximos referidos al segundo nivel en el sistema $\alpha = 0.15$ son 2.09 ‰ y 2.18 ‰, para el sistema $\alpha = 0.5$ son 1.73 ‰ y 1.88 ‰. Se mantiene el mismo desempeño respecto al sistema aislado.

6.2.3 Comparación de valores promedios

Con la finalidad de analizar la variación del comportamiento de cada estructura se mostrarán los resultados comparativos entre los sistemas aislados e híbridos. Se utilizarán los valores promedios correspondientes a los resultados de los 7 registros sísmicos.

El **Gráfico 6.5** y el **Gráfico 6.6** detallan las relaciones de las derivas promedio para cada nivel entre el sistema híbrido y el sistema aislado en la estructura E1.

Gráfico 6.5 Relaciones de derivas por nivel dirección X-X – Límite superior – E1

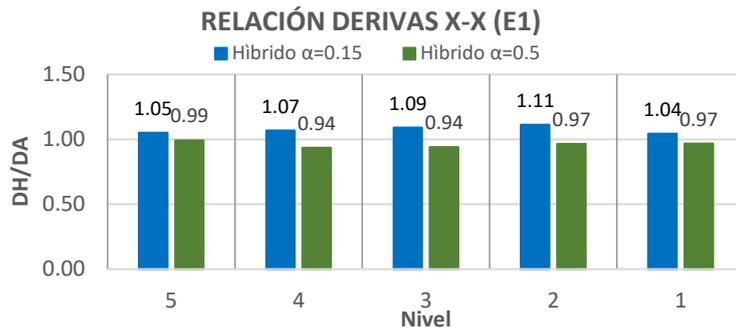
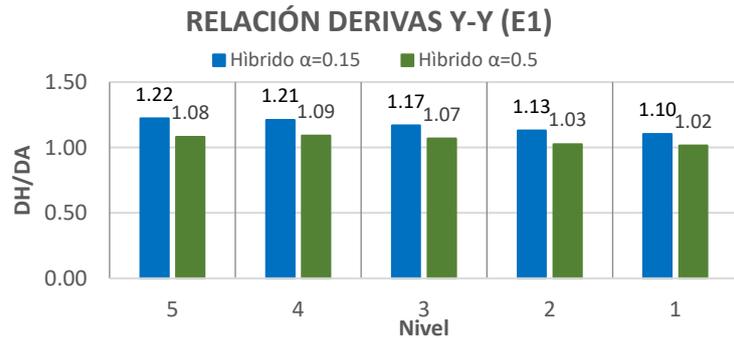


Gráfico 6.6 Relaciones de derivas por nivel dirección Y-Y – Límite superior – E1



Se observa de manera más detallada el incremento de derivas que presenta el sistema híbrido, siendo el único caso el sistema híbrido con $\alpha = 0.5$ en la dirección de análisis X-X que presenta valores menores respecto a las derivas en el sistema aislado. Sin embargo, de acuerdo al **Gráfico 5.16** a mayor valor de amortiguación la deriva aumentará. En el sistema $\alpha = 0.15$ las relaciones oscilan entre 1.04 y 1.22, para el sistema $\alpha = 0.5$ el rango esta entre 0.94 y 1.09.

El **Gráfico 6.7** y el **Gráfico 6.8** se muestran los valores de derivas promedio de todos los sistemas analizados para el diseño de límite superior para la estructura E1 en las direcciones de X-X e Y-Y respectivamente.

Gráfico 6.7 Compilación derivas X-X – E1

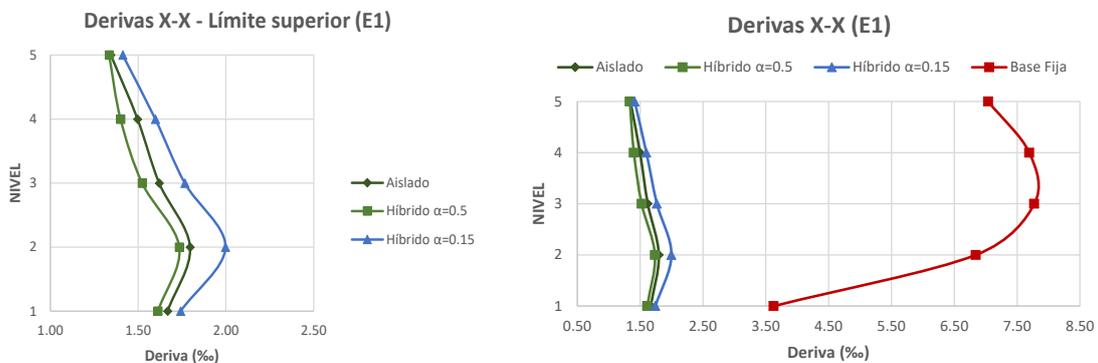
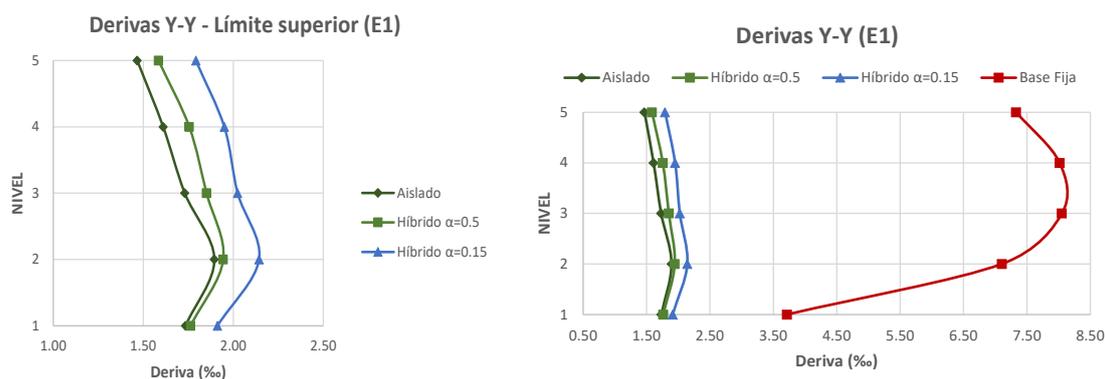


Gráfico 6.8 Compilación derivas Y-Y – E1



Los valores máximos presentes en los gráficos para el sistema $\alpha = 0.15$ son 1.99 ‰ y 2.14 ‰, para el sistema $\alpha = 0.5$ son 1.73 ‰ y 1.94 ‰.

El Gráfico 6.9 y el Gráfico 6.10 detallan las relaciones de las derivas promedio para cada nivel entre el sistema híbrido y el sistema aislado en la estructura E2.

Gráfico 6.9 Relaciones de derivas por nivel dirección X-X – Límite superior – E2

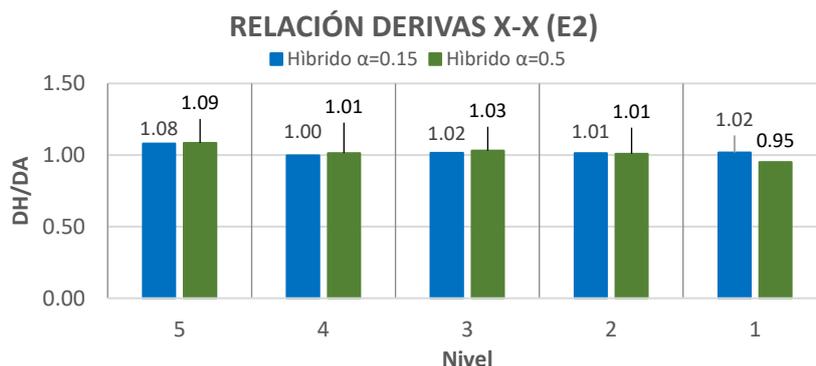
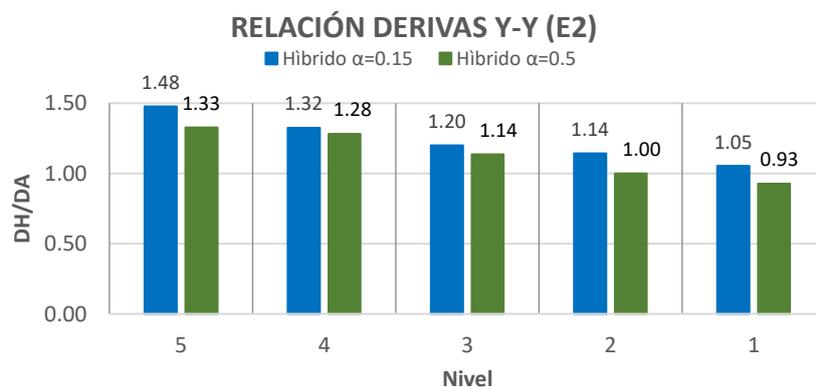


Gráfico 6.10 Relaciones de derivas por nivel dirección Y-Y – Límite superior – E2



En el sistema $\alpha = 0.15$ las relaciones oscilan entre 0.99 y 1.51, para el sistema $\alpha = 0.5$ el rango está entre 0.95 y 1.33. Se tiene un comportamiento similar a la estructura anterior, se presentan mayores valores de derivas en el sistema $\alpha = 0.15$.

El **Gráfico 6.11** y el **Gráfico 6.12** muestran los valores de derivas promedio de todos los sistemas analizados para el diseño de límite superior para la estructura *E2* en las direcciones de X-X e Y-Y respectivamente.

Gráfico 6.11 Compilación derivas X-X – E2

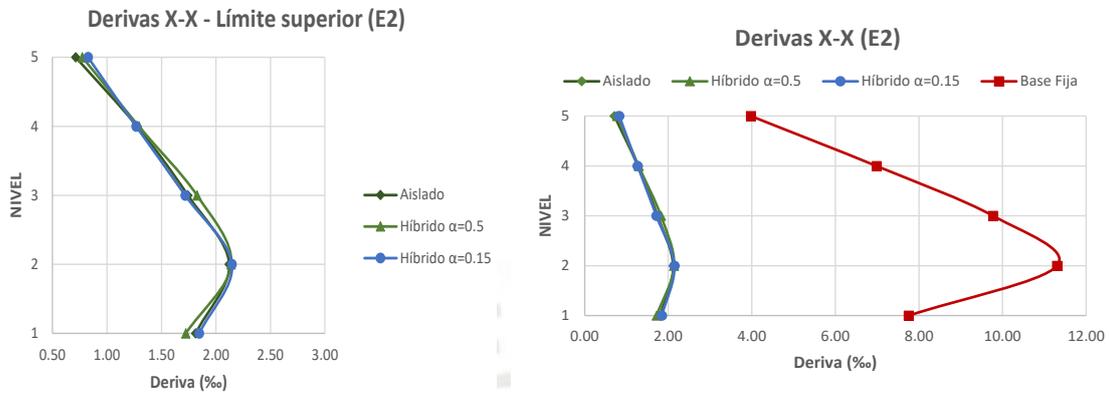
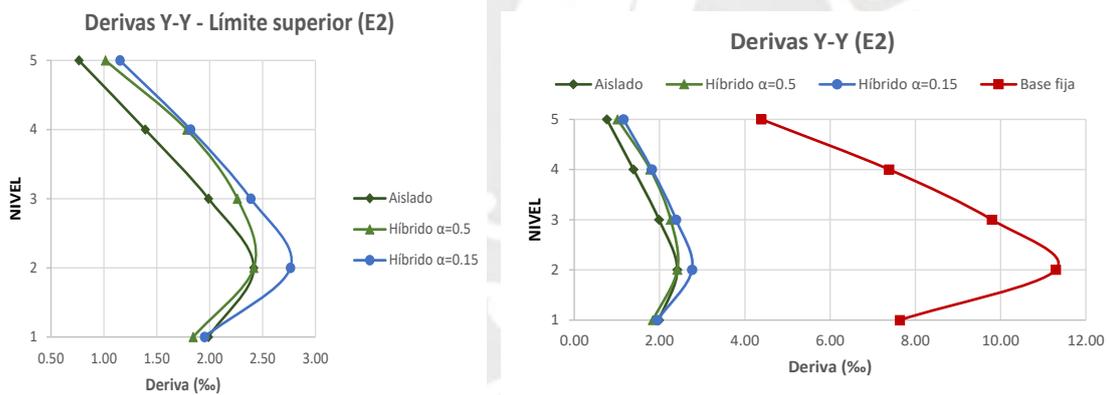


Gráfico 6.12 Compilación derivas Y-Y – E2



Los valores máximos presentes en los gráficos para el sistema $\alpha = 0.15$ son 2.15 ‰ y 2.76 ‰, para el sistema $\alpha = 0.5$ son 2.14 ‰ y 2.42 ‰.

El **Gráfico 6.13** y el **Gráfico 6.14** detallan las relaciones de las derivas promedio para cada nivel entre el sistema híbrido y el sistema aislado en la estructura *E3*.

Gráfico 6.13 Relaciones de derivas por nivel dirección X-X – Límite superior – E3

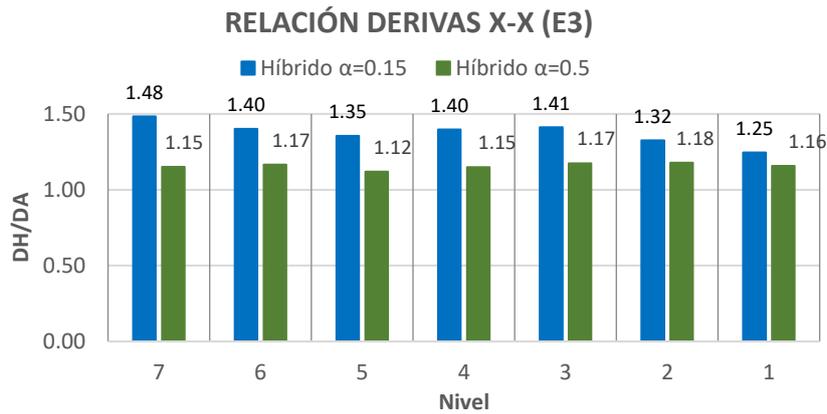
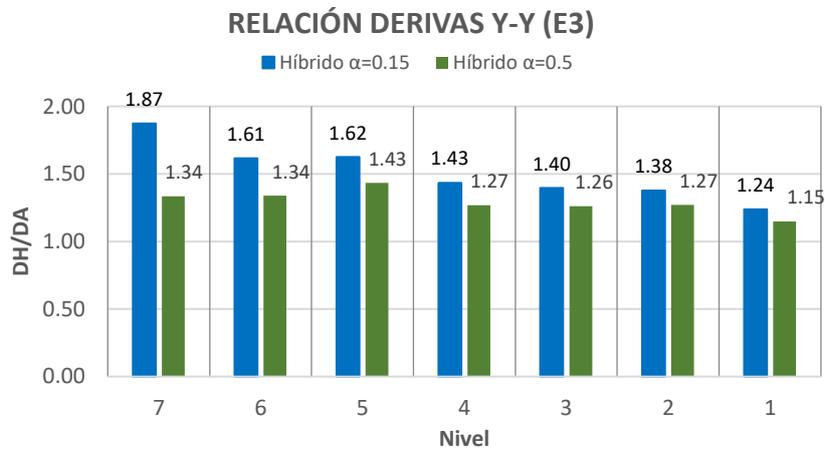


Gráfico 6.14 Relaciones de derivas por nivel dirección Y-Y – Límite superior – E3



En el sistema $\alpha = 0.15$ las relaciones oscilan entre 1.24 y 1.87, para el sistema $\alpha = 0.5$ el rango esta entre 1.04 y 1.34.

El **Gráfico 6.15** y el **Gráfico 6.16** muestran los valores de derivas promedio de todos los sistemas analizados para el diseño de límite superior para la estructura E3 en las direcciones de X-X e Y-Y respectivamente.

Gráfico 6.15 Compilación derivas X-X – E3

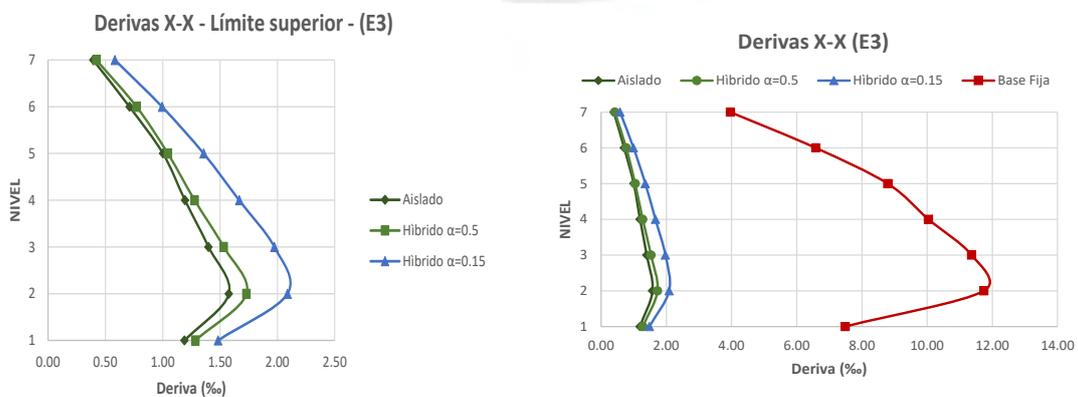
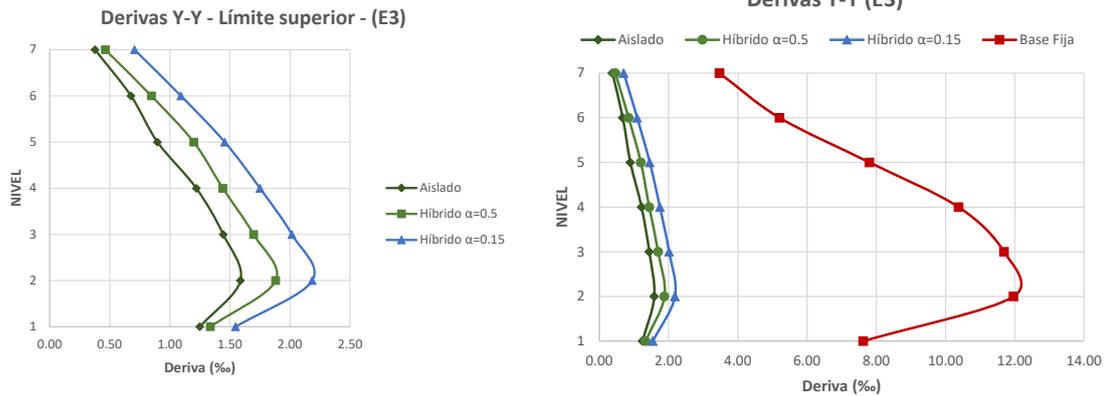


Gráfico 6.16 Compilación derivas Y-Y – E3

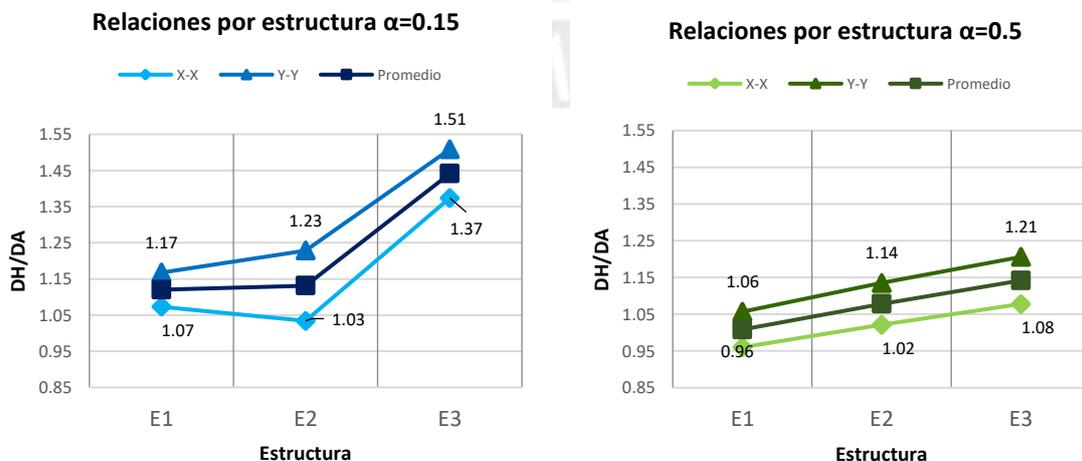


Los valores máximos presentes en los gráficos para el sistema $\alpha = 0.15$ son 2.09 ‰ y 2.18 ‰, para el sistema $\alpha = 0.5$ son 1.73 ‰ y 1.88 ‰.

Se observa una tendencia presente en todas las estructuras donde el sistema híbrido presenta aumento en los valores de derivas. Dentro de los dos sistemas híbridos analizado el que presenta $\alpha = 0.15$ otorga un mayor sacrificio respecto al desempeño de las estructuras. El desempeño de las estructuras no varía porque no se presenta derivas mayores al 3.20 ‰, en este sentido se considera este punto no muy determinante al definir los factores de cálculo de eficiencias.

La estructura E3 muestra las mayores relaciones de derivas y la E1 las menores, esto coincide con el periodo de la base fija con el que están basados estos sistemas. Entre más flexible sea la estructura base, se presentará un mayor sacrificio en cuanto a las derivas de entrepiso. Lo descrito previamente esta detallado en el Gráfico 6.17.

Gráfico 6.17 Variación de relaciones de derivas respecto a las estructuras



6.3 Análisis desplazamiento de base

El análisis de esta sección va enfocado a la comparación del desplazamiento en la base de la estructura entre el sistema aislado y el híbrido. Es necesaria la cuantificación de estos valores para definir el impacto del sistema híbrido por medio de parámetros.

El desplazamiento que sufre el aislador sísmico afecta a su capacidad de compresión máxima de carga axial, entre mayor desplazamiento tenga la edificación esta capacidad se reduce. Por ello, la reducción de este valor implica un mayor factor de seguridad y criterio de prevención de daños en estos dispositivos.

6.3.1 Resultados en el sistema aislado

La **Tabla 6.19** y la **Tabla 6.20** muestran un resumen de los valores de desplazamientos obtenidos en el análisis no lineal Tiempo-Historia para el sistema aislado con el diseño de límite inferior en la estructura *E1*.

Tabla 6.19 Desplazamientos Sistema Aislado X-X – Límite inferior – E1

NIVEL	DESPLAZAMIENTO SISTEMA AISLADO EJE X-X (m) Límite inferior - E1						
	R. Sísmico 1	R. Sísmico 2	R. Sísmico 3	R. Sísmico 4	R. Sísmico 5	R. Sísmico 6	R. Sísmico 7
5	0.215	0.175	0.252	0.271	0.242	0.264	0.212
4	0.211	0.173	0.247	0.268	0.239	0.260	0.209
3	0.207	0.170	0.242	0.265	0.235	0.256	0.206
2	0.203	0.167	0.237	0.261	0.231	0.252	0.202
1	0.197	0.163	0.231	0.257	0.227	0.246	0.197
BASE	0.193	0.160	0.225	0.252	0.222	0.241	0.193

Tabla 6.20 Desplazamientos Sistema Aislado Y-Y – Límite inferior – E1

NIVEL	DESPLAZAMIENTO SISTEMA AISLADO EJE Y-Y (m) Límite inferior - E1						
	R. Sísmico 1	R. Sísmico 2	R. Sísmico 3	R. Sísmico 4	R. Sísmico 5	R. Sísmico 6	R. Sísmico 7
5	0.223	0.225	0.252	0.270	0.242	0.264	0.209
4	0.220	0.223	0.247	0.268	0.239	0.260	0.205
3	0.216	0.221	0.242	0.264	0.235	0.256	0.202
2	0.212	0.218	0.237	0.261	0.231	0.252	0.199
1	0.208	0.215	0.231	0.256	0.227	0.246	0.195
BASE	0.203	0.211	0.225	0.251	0.222	0.241	0.192

Se presenta el valor máximo y promedio de desplazamiento base en la dirección X-X de 0.252m y 0.212m respectivamente; en la dirección Y-Y se obtiene valor máximo y promedio de 0.252m y 0.221m respectivamente.

La **Tabla 6.21** y la **Tabla 6.22** muestran un resumen de los valores de desplazamientos obtenidos en el análisis no lineal Tiempo-Historia para el sistema aislado con el diseño de límite inferior en la estructura *E2*.

Tabla 6.21 Desplazamientos Sistema Aislado X-X – Límite inferior – E2

NIVEL	DESPLAZAMIENTO SISTEMA AISLADO EJE X-X (m) Límite inferior - E2						
	R. Sísmico 1	R. Sísmico 2	R. Sísmico 3	R. Sísmico 4	R. Sísmico 5	R. Sísmico 6	R. Sísmico 7
5	0.253	0.213	0.287	0.313	0.274	0.359	0.260
4	0.252	0.211	0.285	0.311	0.272	0.357	0.257
3	0.249	0.207	0.281	0.308	0.269	0.353	0.253
2	0.245	0.201	0.276	0.303	0.263	0.346	0.246
1	0.240	0.196	0.270	0.297	0.257	0.339	0.239
BASE	0.236	0.191	0.264	0.292	0.251	0.333	0.233

Tabla 6.22 Desplazamientos Sistema Aislado Y-Y – Límite inferior – E2

NIVEL	DESPLAZAMIENTO SISTEMA AISLADO EJE Y-Y (m) Límite inferior - E2						
	R. Sísmico 1	R. Sísmico 2	R. Sísmico 3	R. Sísmico 4	R. Sísmico 5	R. Sísmico 6	R. Sísmico 7
5	0.242	0.261	0.287	0.316	0.274	0.359	0.260
4	0.252	0.259	0.285	0.314	0.272	0.357	0.257
3	0.249	0.255	0.281	0.310	0.269	0.353	0.253
2	0.245	0.249	0.276	0.304	0.263	0.346	0.246
1	0.240	0.242	0.270	0.298	0.257	0.339	0.239
BASE	0.236	0.237	0.264	0.292	0.251	0.333	0.233

Se presenta el valor máximo y promedio de desplazamiento base en la dirección X-X de $0.333m$ y $0.257m$ respectivamente; en la dirección Y-Y se obtiene valor máximo y promedio de $0.333m$ y $0.264m$ respectivamente.

La **Tabla 6.23** y la **Tabla 6.24** muestran un resumen de los valores de desplazamientos obtenidos en el análisis no lineal Tiempo-Historia para el sistema aislado con el diseño de límite inferior en la estructura E3.

Tabla 6.23 Desplazamientos Sistema Aislado X-X – Límite inferior – E3

NIVEL	DESPLAZAMIENTO SISTEMA AISLADO EJE X-X (m) Límite inferior - E3						
	R. Sísmico 1	R. Sísmico 2	R. Sísmico 3	R. Sísmico 4	R. Sísmico 5	R. Sísmico 6	R. Sísmico 7
7	0.184	0.240	0.196	0.322	0.224	0.308	0.233
6	0.184	0.239	0.196	0.321	0.223	0.307	0.232
5	0.183	0.237	0.195	0.320	0.222	0.306	0.230
4	0.182	0.235	0.193	0.317	0.221	0.303	0.228
3	0.179	0.231	0.190	0.314	0.220	0.300	0.224
2	0.177	0.227	0.187	0.311	0.217	0.296	0.220
1	0.174	0.222	0.183	0.306	0.214	0.292	0.216
BASE	0.171	0.219	0.181	0.303	0.212	0.288	0.213

Tabla 6.24 Desplazamientos Sistema Aislado Y-Y – Límite inferior – E3

NIVEL	DESPLAZAMIENTO SISTEMA AISLADO EJE Y-Y (m) Límite inferior - E3						
	R. Sísmico 1	R. Sísmico 2	R. Sísmico 3	R. Sísmico 4	R. Sísmico 5	R. Sísmico 6	R. Sísmico 7
7	0.319	0.317	0.271	0.322	0.192	0.183	0.314
6	0.318	0.316	0.270	0.321	0.191	0.182	0.313
5	0.317	0.314	0.266	0.320	0.190	0.180	0.311
4	0.314	0.311	0.262	0.317	0.189	0.178	0.309
3	0.311	0.307	0.257	0.314	0.187	0.175	0.305
2	0.306	0.302	0.251	0.310	0.185	0.173	0.301
1	0.301	0.297	0.245	0.305	0.182	0.170	0.296
BASE	0.297	0.293	0.241	0.301	0.179	0.168	0.293

Se presenta el valor máximo y promedio de desplazamiento base en la dirección X-X de $0.288m$ y $0.227m$ respectivamente; en la dirección Y-Y se obtiene valor máximo y promedio de $0.297m$ y $0.253m$ respectivamente.

6.3.2 Resultados en el sistema híbrido

Se presentarán datos correspondientes a la estructura E1 con el diseño del límite inferior y $C = 25 \frac{\text{ton}\cdot\text{s}}{\text{m}}$ para cada disipador de fluido viscoso. La **Tabla 6.25** y la **Tabla 6.26** muestran los valores de desplazamientos en el sistema híbrido de coeficiente $\alpha = 0.15$; la **Tabla 6.27** y la **Tabla 6.28** corresponden al sistema híbrido de $\alpha = 0.5$.

Tabla 6.25 Desplazamientos Sistema Híbrido X-X $\alpha=0.15$ – Límite inferior – E1

NIVEL	DESPLAZAMIENTO SISTEMA HIBRIDO EJE X-X (m) Límite inferior $\alpha=0.15$ - E1						
	R. Sísmico 1	R. Sísmico 2	R. Sísmico 3	R. Sísmico 4	R. Sísmico 5	R. Sísmico 6	R. Sísmico 7
5	0.125	0.176	0.195	0.170	0.158	0.201	0.135
4	0.122	0.172	0.190	0.167	0.155	0.197	0.132
3	0.118	0.167	0.184	0.163	0.151	0.192	0.127
2	0.115	0.163	0.178	0.159	0.146	0.187	0.123
1	0.111	0.159	0.171	0.154	0.141	0.181	0.119
BASE	0.107	0.155	0.164	0.150	0.136	0.175	0.115

Tabla 6.26 Desplazamientos Sistema Híbrido Y-Y $\alpha=0.15$ – Límite inferior – E1

NIVEL	DESPLAZAMIENTO SISTEMA HIBRIDO EJE Y-Y (m) Límite inferior $\alpha=0.15$ - E1						
	R. Sísmico 1	R. Sísmico 2	R. Sísmico 3	R. Sísmico 4	R. Sísmico 5	R. Sísmico 6	R. Sísmico 7
5	0.158	0.176	0.195	0.172	0.173	0.174	0.197
4	0.156	0.172	0.190	0.168	0.170	0.169	0.192
3	0.153	0.167	0.184	0.164	0.167	0.164	0.190
2	0.150	0.163	0.178	0.160	0.164	0.158	0.188
1	0.145	0.159	0.171	0.155	0.160	0.151	0.184
BASE	0.141	0.155	0.164	0.150	0.157	0.144	0.180

Para el sistema $\alpha = 0.15$ se presenta el valor máximo y promedio de desplazamiento base en la dirección X-X de $0.175m$ y $0.143m$ respectivamente; en la dirección Y-Y se obtiene valor máximo y promedio de $0.180m$ y $0.156m$ respectivamente.

Tabla 6.27 Desplazamientos Sistema Híbrido X-X $\alpha=0.5$ – Límite inferior – E1

NIVEL	DESPLAZAMIENTO SISTEMA HIBRIDO EJE X-X (m) Límite inferior $\alpha=0.5$ - E1						
	R. Sísmico 1	R. Sísmico 2	R. Sísmico 3	R. Sísmico 4	R. Sísmico 5	R. Sísmico 6	R. Sísmico 7
5	0.131	0.167	0.206	0.201	0.190	0.192	0.171
4	0.128	0.162	0.202	0.199	0.187	0.188	0.167
3	0.125	0.156	0.197	0.196	0.183	0.184	0.163
2	0.122	0.151	0.192	0.193	0.179	0.180	0.159
1	0.118	0.146	0.185	0.189	0.175	0.175	0.154
BASE	0.114	0.143	0.179	0.184	0.170	0.170	0.150

Tabla 6.28 Desplazamientos Sistema Híbrido Y-Y $\alpha=0.15$ – Límite inferior – E1

NIVEL	DESPLAZAMIENTO SISTEMA HIBRIDO EJE Y-Y (m) Límite inferior $\alpha=0.5$ - E1						
	R. Sísmico 1	R. Sísmico 2	R. Sísmico 3	R. Sísmico 4	R. Sísmico 5	R. Sísmico 6	R. Sísmico 7
5	0.179	0.167	0.206	0.202	0.190	0.181	0.192
4	0.176	0.162	0.202	0.199	0.187	0.177	0.189
3	0.173	0.156	0.197	0.196	0.183	0.171	0.186
2	0.170	0.151	0.192	0.193	0.179	0.166	0.182
1	0.166	0.146	0.185	0.189	0.175	0.159	0.178
BASE	0.162	0.143	0.179	0.184	0.170	0.153	0.173

Para el sistema $\alpha = 0.5$ se presenta el valor máximo y promedio de desplazamiento base en la dirección X-X de $0.184m$ y $0.159m$ respectivamente; en la dirección Y-Y se obtiene valor máximo y promedio de $0.184m$ y $0.166m$ respectivamente. Hay una mayor reducción de desplazamiento en el sistema $\alpha = 0.15$ con 33.52% y 29.37%, en el sistema $\alpha = 0.5$ presenta 25.18% y 24.62%.

La **Tabla 6.29** y la **Tabla 6.30** muestran los valores de desplazamientos para el sistema híbrido de $\alpha = 0.15$; la **Tabla 6.31** y la **Tabla 6.32** corresponden al sistema híbrido de $\alpha = 0.5$. Resultados referidos a la estructura E2 con el diseño del límite inferior y el valor del coeficiente de amortiguamiento $C = 25 \frac{\text{ton}\cdot\text{s}}{\text{m}}$ para cada dissipador de fluido viscoso.

Tabla 6.29 Desplazamientos Sistema Híbrido X-X $\alpha=0.15$ – Límite inferior – E2

NIVEL	DESPLAZAMIENTO SISTEMA HIBRIDO EJE X-X (m) Límite inferior $\alpha=0.15$ - E2						
	R. Sísmico 1	R. Sísmico 2	R. Sísmico 3	R. Sísmico 4	R. Sísmico 5	R. Sísmico 6	R. Sísmico 7
5	0.133	0.184	0.197	0.213	0.192	0.203	0.162
4	0.129	0.181	0.194	0.211	0.190	0.200	0.160
3	0.125	0.176	0.191	0.208	0.186	0.196	0.155
2	0.124	0.168	0.186	0.202	0.181	0.191	0.150
1	0.120	0.163	0.180	0.195	0.174	0.187	0.143
BASE	0.117	0.160	0.175	0.190	0.168	0.183	0.139

Tabla 6.30 Desplazamientos Sistema Híbrido Y-Y $\alpha=0.15$ – Límite inferior – E2

NIVEL	DESPLAZAMIENTO SISTEMA HIBRIDO EJE Y-Y (m) Límite inferior $\alpha=0.15$ - E2						
	R. Sísmico 1	R. Sísmico 2	R. Sísmico 3	R. Sísmico 4	R. Sísmico 5	R. Sísmico 6	R. Sísmico 7
5	0.176	0.184	0.197	0.213	0.192	0.178	0.224
4	0.174	0.181	0.194	0.211	0.190	0.174	0.223
3	0.171	0.176	0.191	0.207	0.186	0.167	0.219
2	0.166	0.168	0.186	0.201	0.181	0.159	0.213
1	0.160	0.163	0.180	0.194	0.174	0.149	0.206
BASE	0.155	0.160	0.175	0.188	0.168	0.143	0.199

Para el sistema $\alpha = 0.15$ se presenta el valor máximo y promedio de desplazamiento base en la dirección X-X de $0.190m$ y $0.162m$ respectivamente; en la dirección Y-Y se obtiene valor máximo y promedio de $0.199m$ y $0.170m$ respectivamente.

Tabla 6.31 Desplazamientos Sistema Híbrido X-X $\alpha=0.5$ – Límite inferior – E2

NIVEL	DESPLAZAMIENTO SISTEMA HIBRIDO EJE X-X (m) Límite inferior $\alpha=0.5$ - E2						
	R. Sísmico 1	R. Sísmico 2	R. Sísmico 3	R. Sísmico 4	R. Sísmico 5	R. Sísmico 6	R. Sísmico 7
5	0.127	0.190	0.218	0.234	0.218	0.208	0.205
4	0.125	0.187	0.216	0.232	0.216	0.206	0.203
3	0.122	0.181	0.213	0.229	0.212	0.202	0.199
2	0.118	0.176	0.208	0.224	0.207	0.197	0.194
1	0.113	0.170	0.203	0.218	0.200	0.191	0.188
BASE	0.110	0.165	0.198	0.213	0.195	0.186	0.183

Tabla 6.32 Desplazamientos Sistema Híbrido X-X $\alpha=0.5$ – Límite inferior – E2

NIVEL	DESPLAZAMIENTO SISTEMA HIBRIDO EJE Y-Y (m) Límite inferior $\alpha=0.5$ - E2						
	R. Sísmico 1	R. Sísmico 2	R. Sísmico 3	R. Sísmico 4	R. Sísmico 5	R. Sísmico 6	R. Sísmico 7
5	0.197	0.190	0.218	0.235	0.218	0.208	0.221
4	0.196	0.187	0.216	0.233	0.216	0.206	0.219
3	0.193	0.181	0.213	0.229	0.212	0.202	0.216
2	0.189	0.173	0.208	0.224	0.207	0.197	0.210
1	0.183	0.166	0.203	0.218	0.200	0.191	0.204
BASE	0.178	0.163	0.198	0.212	0.195	0.186	0.198

Para el sistema $\alpha = 0.5$ se presenta el valor máximo y promedio de desplazamiento base en la dirección X-X de 0.184m y 0.159m respectivamente; en la dirección Y-Y se obtiene valor máximo y promedio de 0.184m y 0.166m respectivamente. Hay una mayor reducción de desplazamiento en el sistema $\alpha = 0.15$ con 37.19% y 35.71%, en el sistema $\alpha = 0.5$ presenta 30.57% y 27.95%.

La **Tabla 6.33** y la **Tabla 6.34** muestran los valores de desplazamientos para el sistema híbrido de $\alpha = 0.15$; la **Tabla 6.35** y la **Tabla 6.36** corresponden al sistema híbrido de $\alpha = 0.5$. Resultados referidos a la estructura E3 con el diseño del límite inferior y el valor del coeficiente de amortiguamiento $C = 25 \frac{\text{ton}\cdot\text{s}}{\text{m}}$ para cada disipador de fluido viscoso.

Tabla 6.33 Desplazamientos Sistema Híbrido X-X $\alpha=0.15$ – Límite inferior – E3

NIVEL	DESPLAZAMIENTO SISTEMA HIBRIDO EJE X-X (m) Límite inferior $\alpha=0.15$ - E3						
	R. Sísmico 1	R. Sísmico 2	R. Sísmico 3	R. Sísmico 4	R. Sísmico 5	R. Sísmico 6	R. Sísmico 7
7	0.106	0.148	0.161	0.190	0.189	0.129	0.143
6	0.105	0.146	0.160	0.189	0.188	0.129	0.142
5	0.103	0.143	0.159	0.186	0.186	0.130	0.139
4	0.100	0.138	0.157	0.183	0.182	0.132	0.136
3	0.096	0.133	0.154	0.179	0.178	0.133	0.132
2	0.093	0.127	0.150	0.174	0.173	0.134	0.128
1	0.088	0.120	0.146	0.168	0.167	0.132	0.123
BASE	0.086	0.116	0.142	0.164	0.163	0.130	0.119

Tabla 6.34 Desplazamientos Sistema Híbrido X-X $\alpha=0.15$ – Límite inferior – E3

NIVEL	DESPLAZAMIENTO SISTEMA HIBRIDO EJE Y-Y (m) Límite inferior $\alpha=0.15$ - E3						
	R. Sísmico 1	R. Sísmico 2	R. Sísmico 3	R. Sísmico 4	R. Sísmico 5	R. Sísmico 6	R. Sísmico 7
7	0.173	0.180	0.188	0.189	0.168	0.139	0.162
6	0.172	0.179	0.186	0.188	0.166	0.138	0.161
5	0.169	0.177	0.184	0.186	0.162	0.136	0.160
4	0.165	0.174	0.180	0.182	0.157	0.134	0.157
3	0.160	0.171	0.175	0.178	0.152	0.131	0.153
2	0.155	0.167	0.169	0.172	0.147	0.128	0.149
1	0.149	0.162	0.162	0.166	0.142	0.124	0.144
BASE	0.144	0.159	0.158	0.162	0.139	0.121	0.141

Para el sistema $\alpha = 0.15$ se presenta el valor máximo y promedio de desplazamiento base en la dirección X-X de 0.164m y 0.131m respectivamente; en la dirección Y-Y se obtiene valor máximo y promedio de 0.162m y 0.146m respectivamente.

Tabla 6.35 Desplazamientos Sistema Híbrido X-X $\alpha=0.5$ – Límite inferior – E3

NIVEL	DESPLAZAMIENTO SISTEMA HIBRIDO EJE X-X (m) Límite inferior $\alpha=0.5$ - E3						
	R. Sísmico 1	R. Sísmico 2	R. Sísmico 3	R. Sísmico 4	R. Sísmico 5	R. Sísmico 6	R. Sísmico 7
7	0.106	0.177	0.165	0.207	0.192	0.165	0.176
6	0.106	0.176	0.164	0.206	0.191	0.164	0.174
5	0.105	0.174	0.163	0.204	0.189	0.162	0.172
4	0.104	0.171	0.162	0.201	0.186	0.158	0.169
3	0.102	0.167	0.159	0.198	0.183	0.155	0.165
2	0.100	0.162	0.156	0.194	0.178	0.152	0.161
1	0.097	0.156	0.152	0.190	0.174	0.149	0.157
BASE	0.095	0.153	0.149	0.186	0.170	0.146	0.153

Tabla 6.36 Desplazamientos Sistema Híbrido X-X $\alpha=0.5$ – Límite inferior – E3

NIVEL	DESPLAZAMIENTO SISTEMA HIBRIDO EJE Y-Y (m) Límite inferior $\alpha=0.5$ - E3						
	R. Sísmico 1	R. Sísmico 2	R. Sísmico 3	R. Sísmico 4	R. Sísmico 5	R. Sísmico 6	R. Sísmico 7
7	0.215	0.248	0.208	0.209	0.153	0.156	0.214
6	0.214	0.247	0.207	0.207	0.152	0.154	0.212
5	0.213	0.244	0.204	0.205	0.149	0.152	0.209
4	0.210	0.241	0.200	0.202	0.145	0.150	0.206
3	0.208	0.237	0.195	0.199	0.141	0.148	0.201
2	0.204	0.232	0.190	0.194	0.136	0.145	0.197
1	0.200	0.227	0.184	0.190	0.132	0.141	0.192
BASE	0.197	0.223	0.180	0.187	0.129	0.138	0.188

Para el sistema $\alpha = 0.5$ se presenta el valor máximo y promedio de desplazamiento base en la dirección X-X de 0.186m y 0.150m respectivamente; en la dirección Y-Y se obtiene valor máximo y promedio de 0.197m y 0.178m respectivamente. Hay una mayor reducción de desplazamiento en el sistema $\alpha = 0.15$ con 42.02% y 42.22%, en el sistema $\alpha = 0.5$ presenta 33.61% y 29.86%.

6.3.3 Comparación de valores

El **Gráfico 6.18** y el **Gráfico 6.19** muestran los valores de desplazamientos promedio de todos los sistemas analizados para el diseño de límite inferior en la estructura *E1* correspondientes a las direcciones de X-X e Y-Y respectivamente.

Gráfico 6.18 Desplazamientos para cada sistema X-X – E1

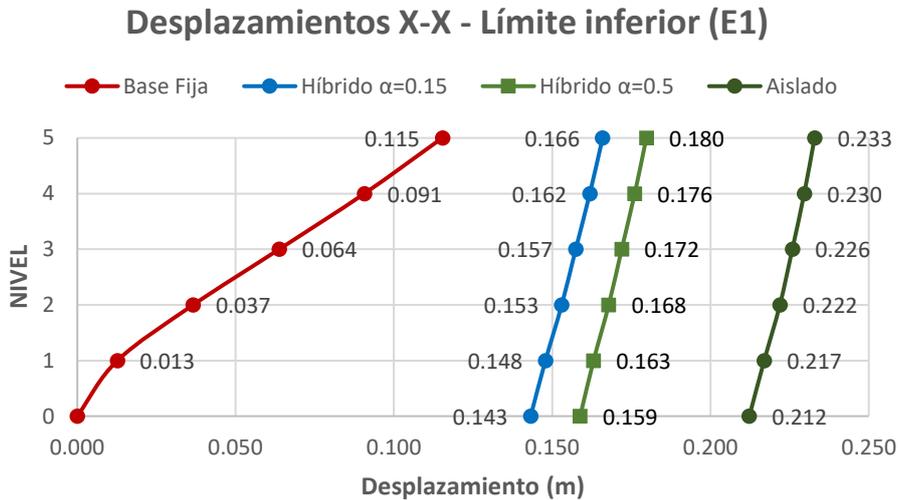
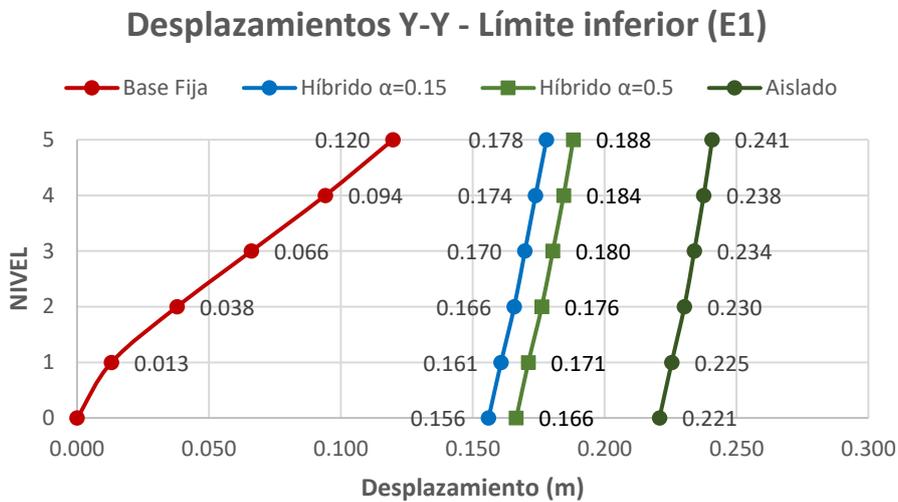


Gráfico 6.19 Desplazamientos para cada sistema Y-Y – E1



El **Gráfico 6.20** y el **Gráfico 6.21** muestran los valores de desplazamientos promedio de todos los sistemas analizados para el diseño de límite inferior en la estructura *E2* correspondientes a las direcciones de X-X e Y-Y respectivamente.

Gráfico 6.20 Desplazamientos para cada sistema X-X – E2

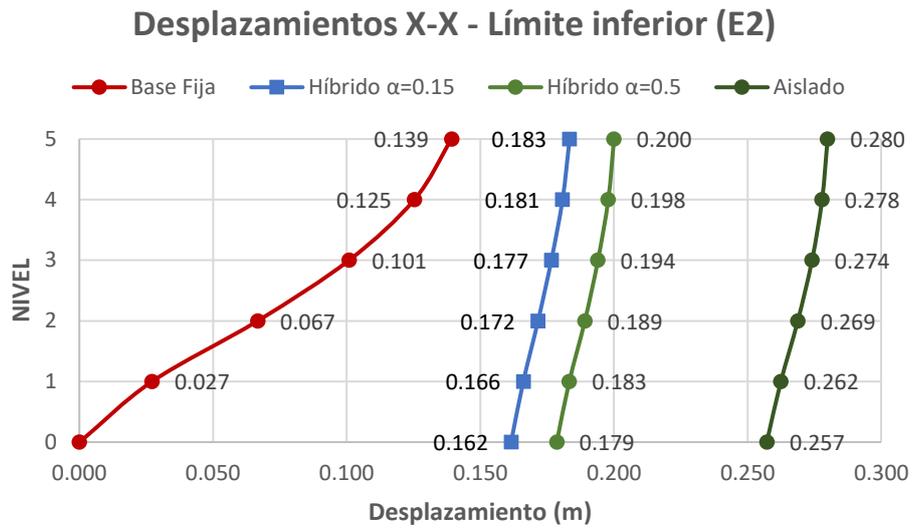
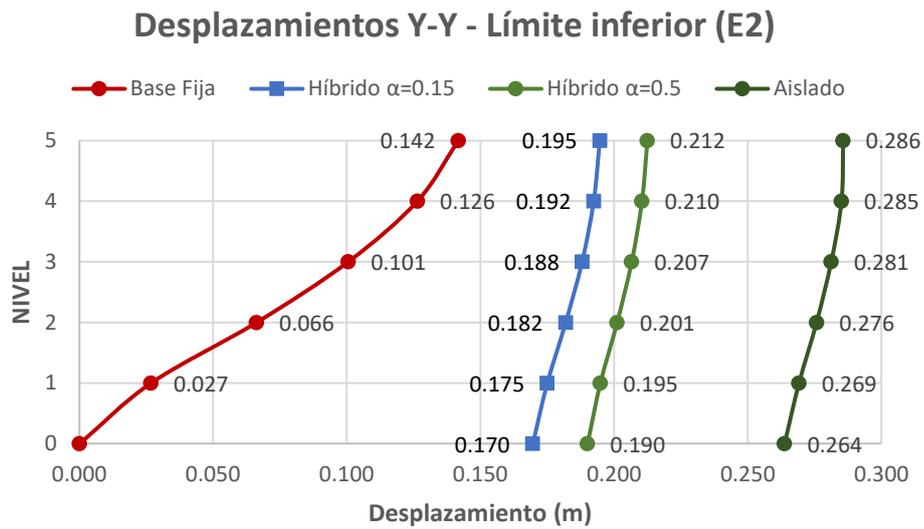


Gráfico 6.21 Desplazamientos para cada sistema Y-Y – E2



El Gráfico 6.22 y el Gráfico 6.23 muestran los valores de desplazamientos promedio de todos los sistemas analizados para el diseño de límite inferior en la estructura E3 correspondientes a las direcciones de X-X e Y-Y respectivamente.

Gráfico 6.22 Desplazamientos para cada sistema X-X – E3

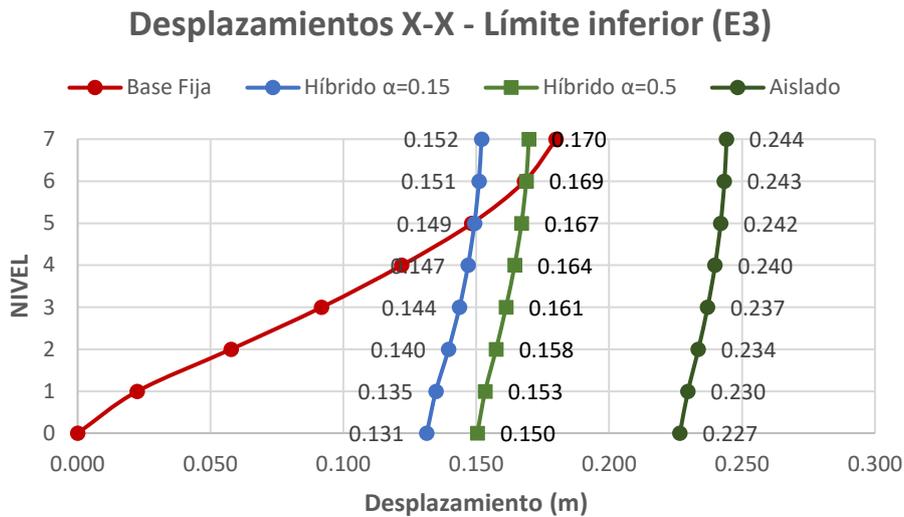
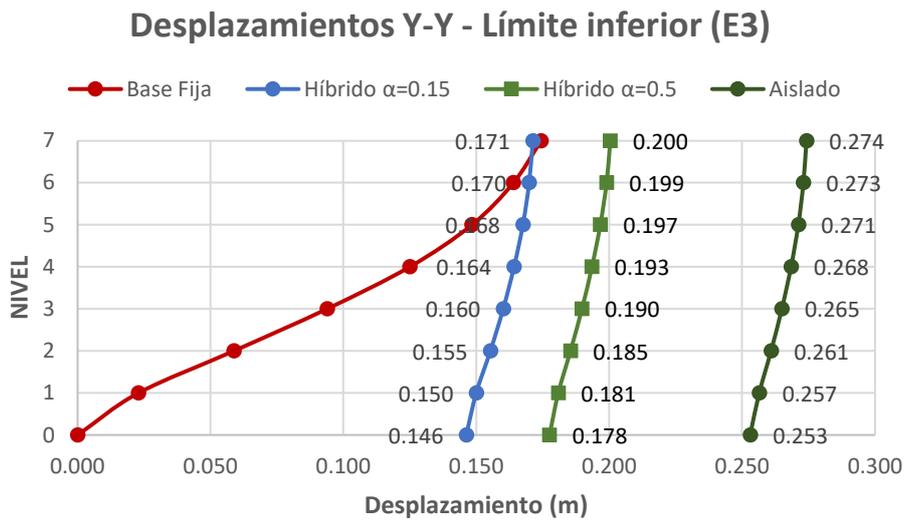


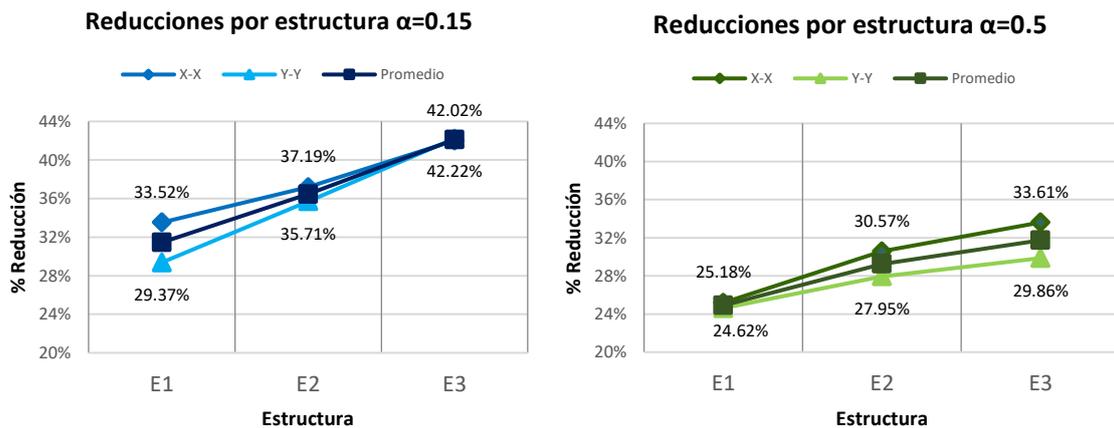
Gráfico 6.23 Desplazamientos para cada sistema Y-Y – E3



Al comparar los resultados de todas las estructuras se observa que hay una tendencia en el porcentaje de reducción de desplazamientos. La estructura E3 muestra valores mayores y E1 las menores, de igual manera al caso de derivas esto coincide con el periodo de la base fija con el que están basados estos sistemas.

Entre más flexible sea la estructura base, se presentará una mayor reducción de desplazamientos en la base. Lo descrito previamente esta detallado en el **Gráfico 6.24**.

Gráfico 6.24 Variación de reducción de desplazamientos base por estructura

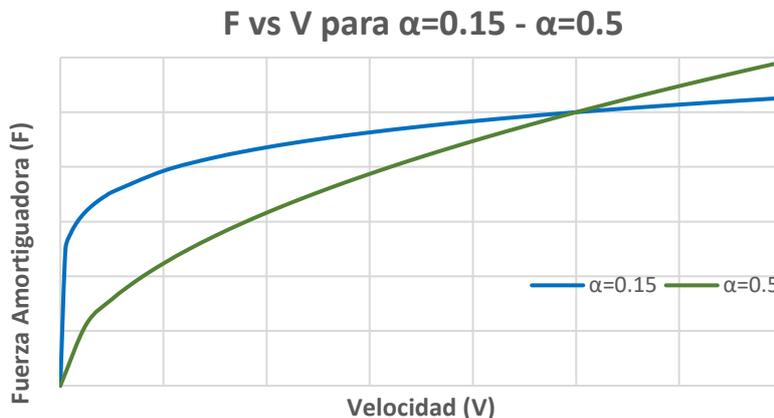


6.4 Influencia de la variabilidad del coeficiente de velocidad

Los resultados previos muestran comportamientos distintos en estos dos sistemas. Es necesario saber la razón de esta variación y la manera en que influirá el coeficiente de velocidad α en el diseño del sistema híbrido de disipación de energía.

Se elaboró el Gráfico 6.25 para mostrar el comportamiento del amortiguador debido al cambio del coeficiente de velocidad α .

Gráfico 6.25 Comportamiento de la Fuerza amortiguadora con el cambio de α



El dispositivo de fluido viscoso responde con mayor fuerza amortiguadora para valores menores de coeficientes de velocidad. Este comportamiento es coherente con los resultados obtenidos donde el sistema con $\alpha = 0.15$ mayor reducción de desplazamiento debido a que reacciona con mayor fuerza amortiguadora.

En el análisis de eficiencia (E) se observa que el sistema $\alpha = 0.15$ presenta valores menores a pesar de que el parámetro de reducción de desplazamiento tiene mayor

factor de importancia. Se puede inferir que el aumento de derivas y fuerzas basales en estos sistemas se acrecientan mucho más. Para un análisis práctico se tomó el promedio de estas dos gráficas, tanto la eficiencia para $\alpha = 0.15$ y $\alpha = 0.5$, para definir un valor de C .

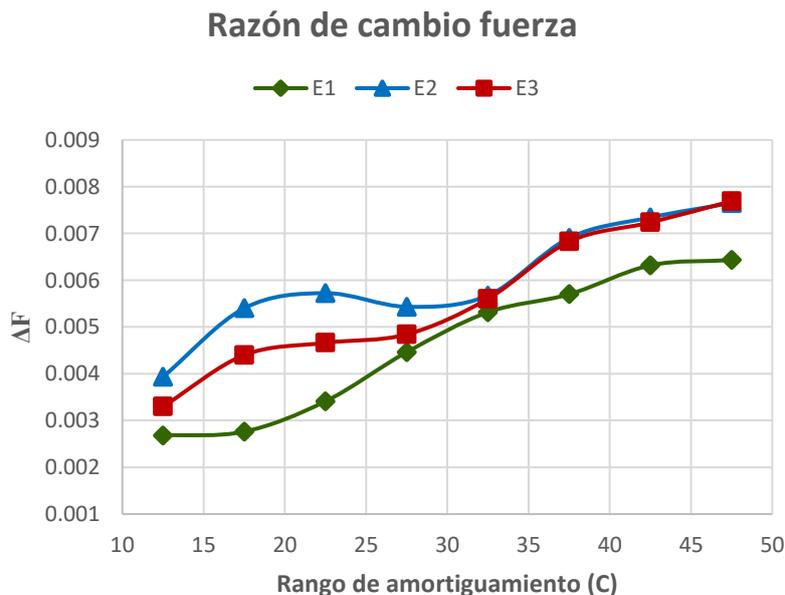
6.5 Comportamiento variables respecto al amortiguamiento

Todas las variables analizadas presentan un comportamiento ascendente respecto al aumento del amortiguamiento. Lo que se plantea analizar es el grado de aumento, pendiente de las gráficas, respecto al rango de amortiguaciones. Es decir, definir en qué zonas se produce un aumento abrupto o acelerado y si se puede interpretar alguna tendencia.

Los gráficos a presentarse representaran los valores promedios de los resultados analizados para sistemas con coeficientes de velocidad de $\alpha = 0.15$ y $\alpha = 0.5$. El eje vertical muestra el valor de la pendiente, parámetro adimensional, y el horizontal en el rango de amortiguamiento donde es analizado. El **Anexo O** contiene las razones de cambio para cada valor de α .

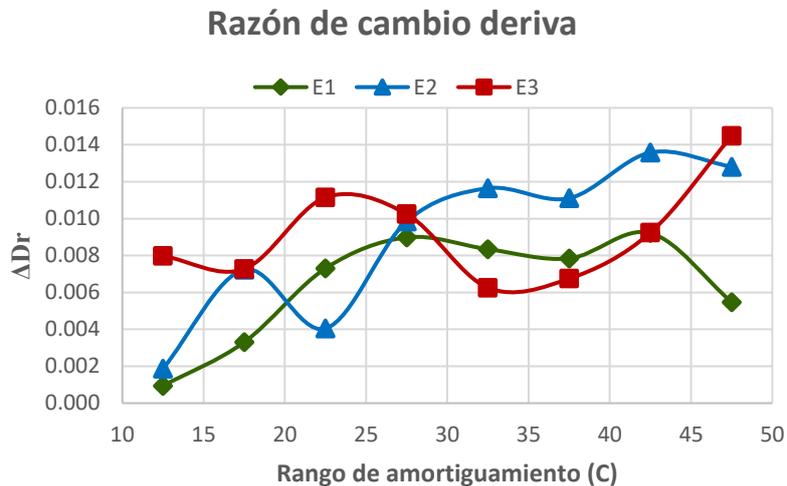
El **Gráfico 6.26** muestran la razón de cambio de la fuerza basal promedio para cada estructura. El comportamiento ascendente indica que hay un mayor incremento de esta variable mientras el rango de amortiguamiento sea mayor. No se evidencia un pico máximo de acuerdo a estos resultados.

Gráfico 6.26 Razón de cambio de la fuerza basal promedio



El **Gráfico 6.27** muestra la razón de cambio de aumento de derivas promedio para cada estructura. A diferencia del caso de la fuerza basal no se puede distinguir un comportamiento predominante, se presenta un comportamiento particular para cada estructura.

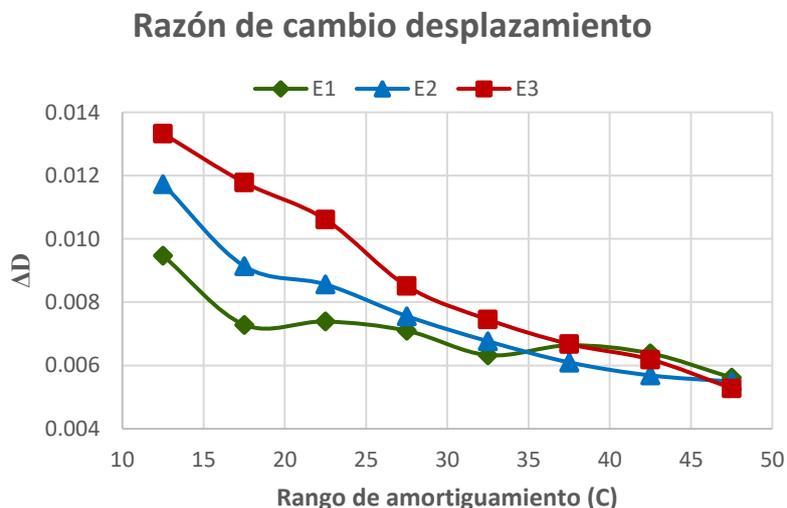
Gráfico 6.27 Razón de cambio de derivas promedio



La estructura *E1* muestra poco aumento de esta variable a rangos menores de amortiguamiento, por otro lado, a mayor rango el aumento se va estabilizando. La estructura *E2* presenta un comportamiento ascendente, a mayores rangos de amortiguamiento el incremento de la variable es mayor. La estructura *E3* mantiene un valor casi constante para todo el rango estudiado, exceptuando rangos mayores donde se incrementa.

El **Gráfico 6.28** muestra la razón de cambio de la reducción del desplazamiento en la estructura *E1*, *E2* y *E3* respectivamente.

Gráfico 6.28 Razón de cambio de reducción de desplazamiento promedio



Se puede evidenciar en todos los casos el comportamiento descendente de la razón de cambio, esto indica que a mayores rangos de amortiguamiento se reduce la efectivización de la reducción del desplazamiento.

La tendencia de los resultados plantea que en un punto la razón de cambio pueda llegar al de cero o negativo, esto significaría un valor máximo relativo de la reducción de desplazamiento.

Mediante estos datos se puede explicar el comportamiento del gráfico de eficiencia. A valores mayores de amortiguaciones el aporte de la reducción de desplazamiento hacia la eficiencia es menor, esto debido a que la razón de cambio disminuye. Todo lo contrario, sucede con las variables de derivas y fuerzas basales, por ello el gráfico de eficiencia logra tener un pico que balancea estos tres parámetros.

6.6 Influencia del sistema híbrido en la fuerza restitutiva

Todo sistema híbrido debe ser diseñado para proporcionar una fuerza restitutiva equivalente al 2.5% del peso sísmico de la estructura. Se analizará la influencia sobre esta variable en los sistemas híbridos de disipación de energía modelados para los diseños de límite inferior donde los valores de fuerza restitutiva son más críticos.

Los gráficos elaborados detallan en el eje vertical los valores de fuerzas restitutivas en proporción del peso sísmico de la estructura y en el eje horizontal los casos de análisis. Para la obtención es necesario utilizar los gráfico histéresis de los sistemas híbrido para cada registro sísmico.

El **Gráfico 6.29** y el **Gráfico 6.30** muestran las fuerzas restitutivas de los sistemas analizados para su respectiva dirección de análisis en la estructura E1.

Gráfico 6.29 Fuerza restitutiva presente en los sistemas de análisis X-X (E1)

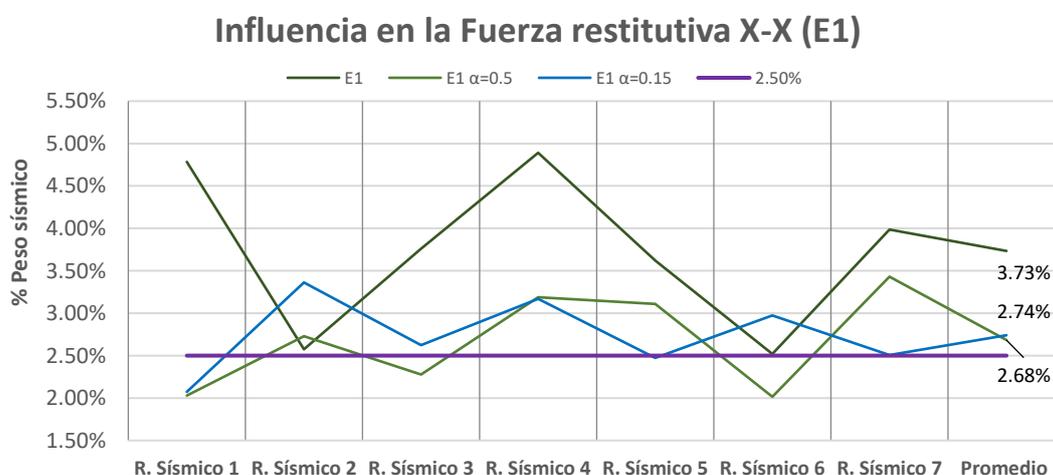
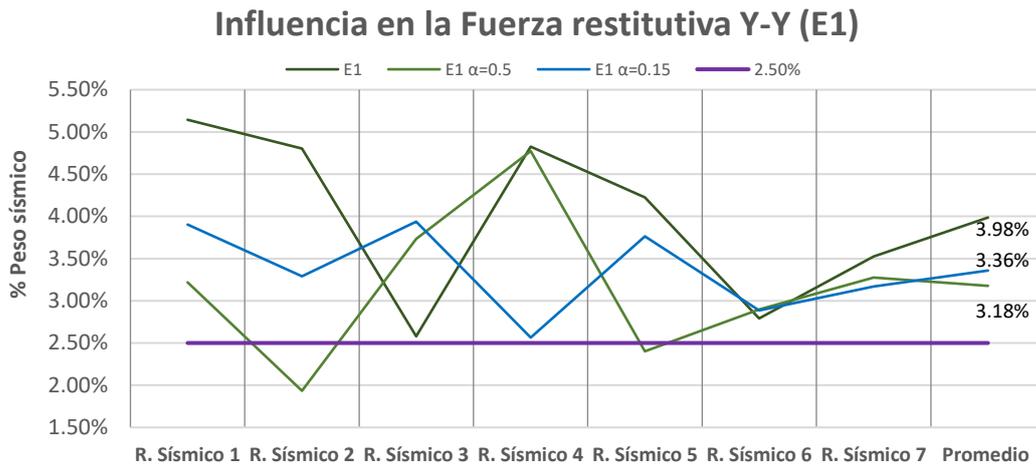


Gráfico 6.30 Fuerza restitutiva presente en los sistemas de análisis Y-Y (E1)



El Gráfico 6.31 y el Gráfico 6.32 muestran las fuerzas restitutivas de los sistemas analizados para su respectiva dirección de análisis en la estructura E2.

Gráfico 6.31 Fuerza restitutiva presente en los sistemas de análisis X-X (E2)

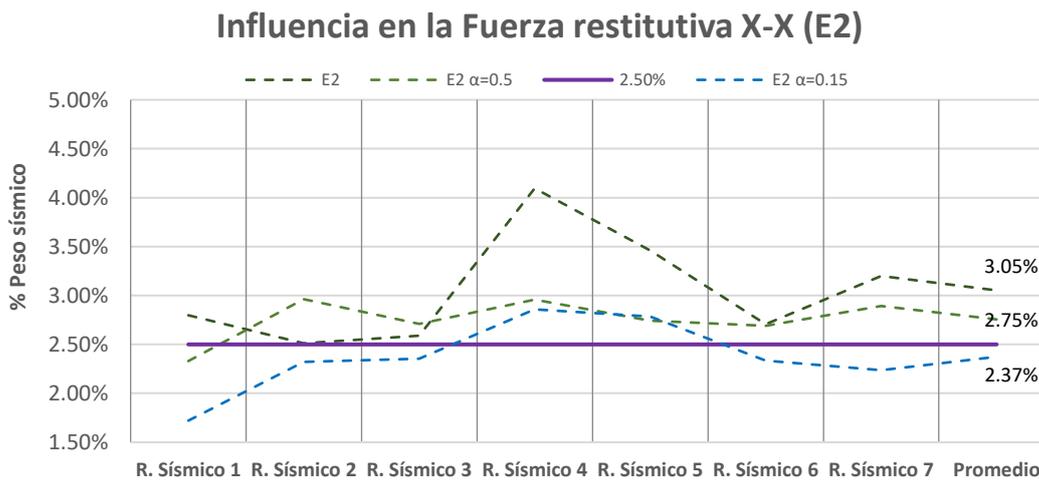
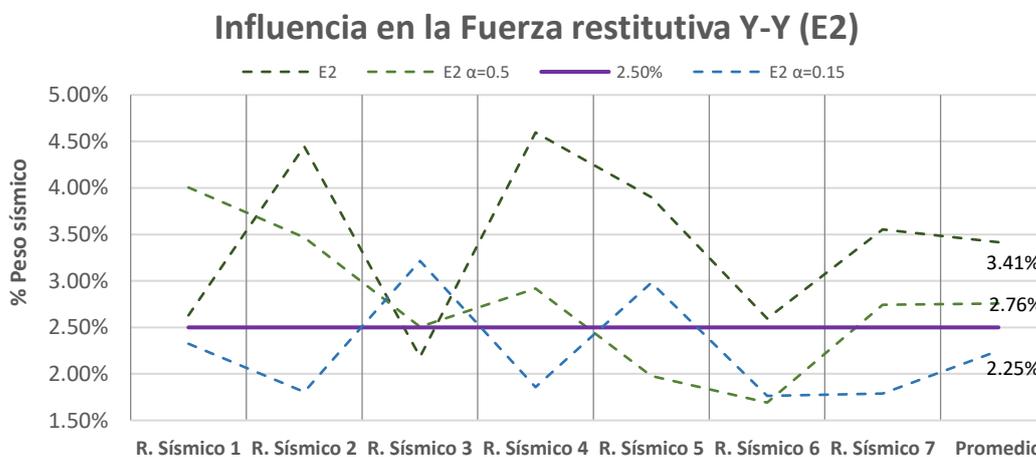


Gráfico 6.32 Fuerza restitutiva presente en los sistemas de análisis Y-Y (E2)



El **Gráfico 6.33** y el **Gráfico 6.34** muestran las fuerzas restitutivas de los sistemas analizados para su respectiva dirección de análisis en la estructura E3.

Gráfico 6.33 Fuerza restitutiva presente en los sistemas de análisis X-X (E3)

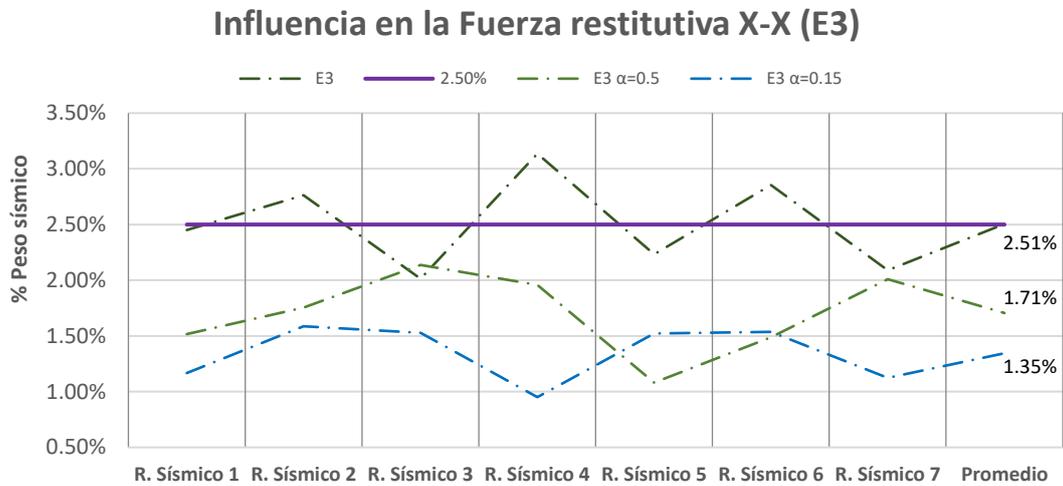
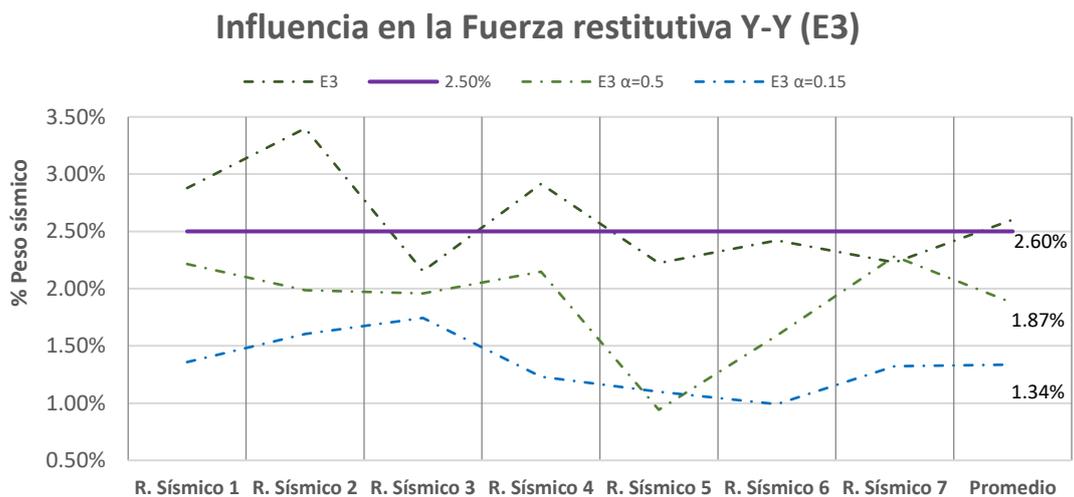


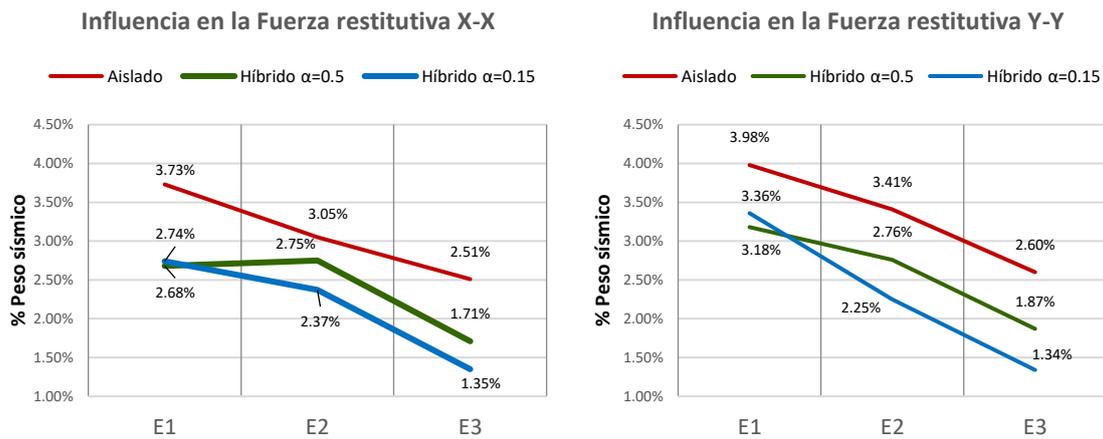
Gráfico 6.34 Fuerza restitutiva presente en los sistemas de análisis Y-Y (E3)



Todos los sistemas híbridos presentan valores menores de las fuerzas restitutivas. La presencia de mayores valores de fuerzas con menores desplazamientos ocasiona una variación de la rigidez del sistema, de manera principal a la rigidez de post-fluencia. El resultado es que la distancia entre la fuerza máxima y la fuerza lateral al 50% del desplazamiento total se acorte.

Se elaboró el **Gráfico 6.35** para representar los valores promedios de todos los gráficos previos. La reducción es casi constante, alrededor de 1%, independiente de los sistemas. Siendo para X-X el máximo 1.16% y el mínimo 0.68%, en el caso de la dirección Y-Y estos valores son 1.26% y 0.62%.

Gráfico 6.35 Resultados promedios de Influencia en la Fuerza restitutiva



Para mostrar visualmente esta variación, se elaboró el Gráfico 6.36, el Gráfico 6.37 y el Gráfico 6.38 que contienen las envolventes de los diagramas histéresis de todos los registros sísmicos para la estructura E1, E2 y E3 respectivamente.

Gráfico 6.36 Envolvente histéretico de todos los registros en cada sistema – E1

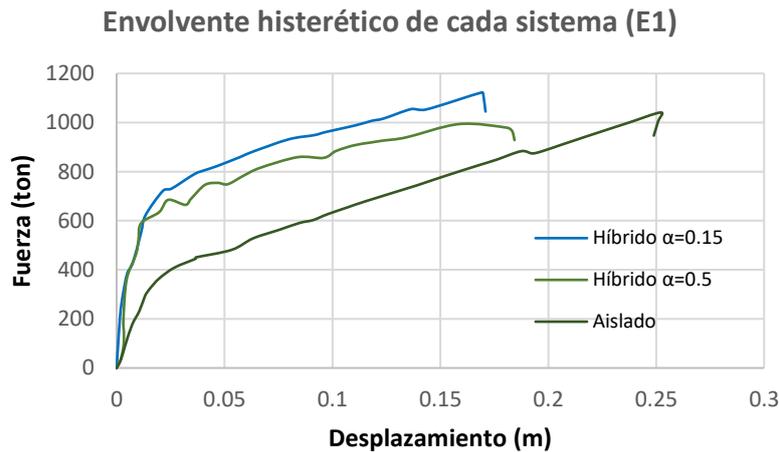


Gráfico 6.37 Envolvente histéretico de todos los registros en cada sistema – E2

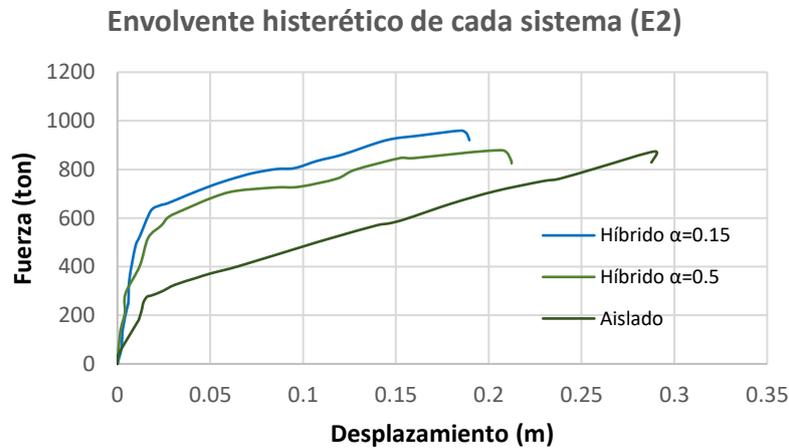
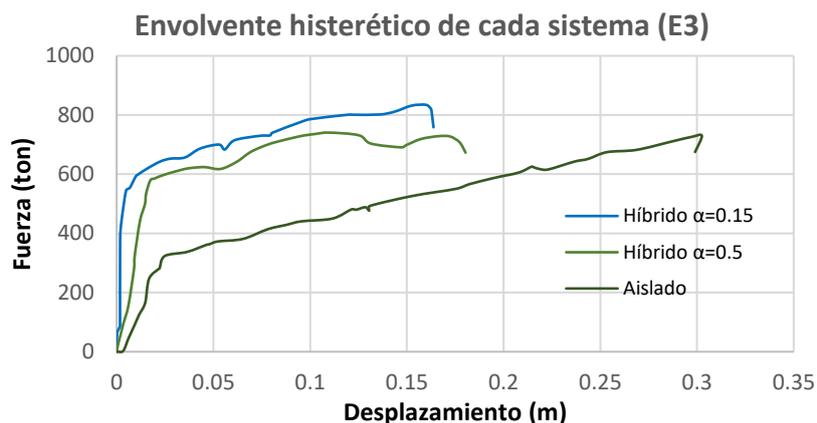


Gráfico 6.38 Envoltente histerético de todos los registros en cada sistema – E3



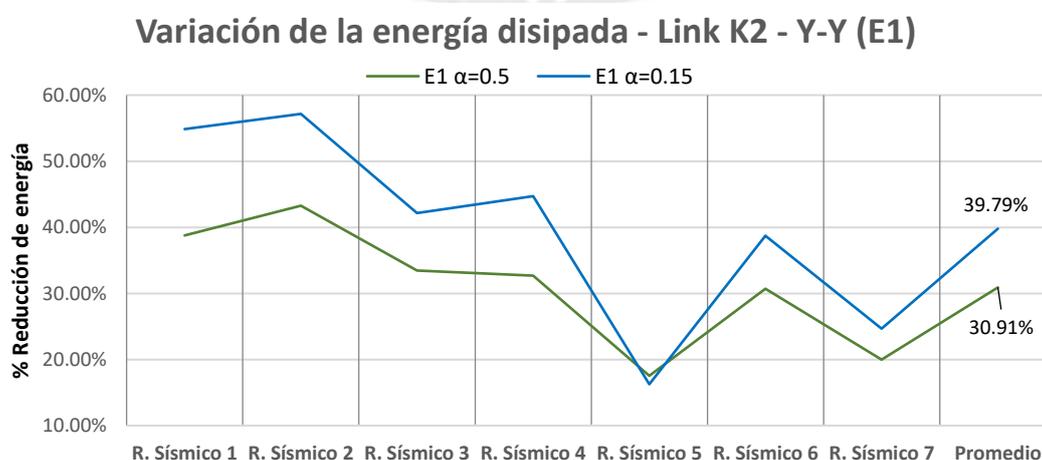
6.7 Variación de la disipación de energía en los aisladores

Es necesario conocer cómo afecta la implementación del sistema híbrido a los aisladores, comportamiento histerético, respecto a su estado inicial en el sistema de aislamiento base. La medición se realizará por medio del balance de energía al comparar la participación energética. Es decir, se analizará la variación de la disipación de energía de estos dispositivos.

La presentación de resultados se dará tomando los aisladores denominados link K2 y K29, representando al aislador tipo A y B respectivamente. Por razones prácticas la medición de la variación se realizará en el diseño para límite inferior para todos los sistemas y solo se mostrará el dispositivo que presente mayor reducción respecto a este parámetro en una dirección.

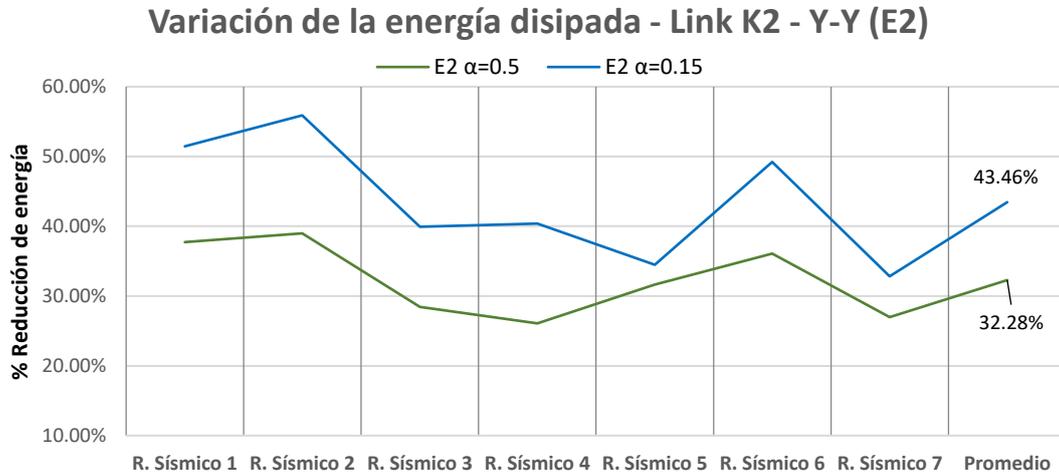
Los gráficos a presentar describirán la reducción de energía disipada del aislador, para cada sistema híbrido analizado, respecto a la condición de este en el sistema de aislamiento base. El Gráfico 6.39 muestra la variación de la participación energética del aislador A en la dirección Y-Y correspondientes a la estructura E1.

Gráfico 6.39 Reducción de la energía disipada Aislador A – Y-Y – Link K2 (E1)



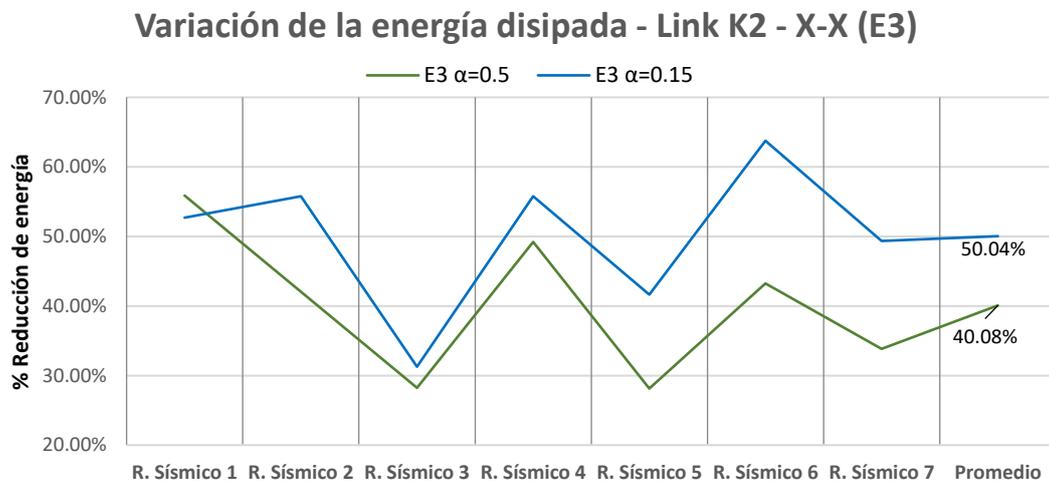
El **Gráfico 6.40** muestran la variación de la participación energética del aislador A en la dirección Y-Y correspondiente a la estructura E2.

Gráfico 6.40 Reducción de la energía disipada Aislador A – Y-Y – Link K2 (E2)



El **Gráfico 6.41** muestra la variación de la participación energética del aislador A en la dirección X-X correspondiente a la estructura E3.

Gráfico 6.41 Reducción de la energía disipada Aislador A – X-X– Link K2 (E3)



El **Anexo P** presenta las gráficas completas, tanto del link K2 y K29 para cada dirección de análisis. El **Anexo I** muestra los diagramas histéresis de los aisladores en el Sistema Híbrido en un diseño límite inferior.

Se elaboró el **Gráfico 6.42** y el **Gráfico 6.43** para detallar todos los valores promedios obtenidos para cada tipo de aislador presente en todas las estructuras.

Gráfico 6.42 Resultados promedios en Variación de energía – Aislador A y B – X-X

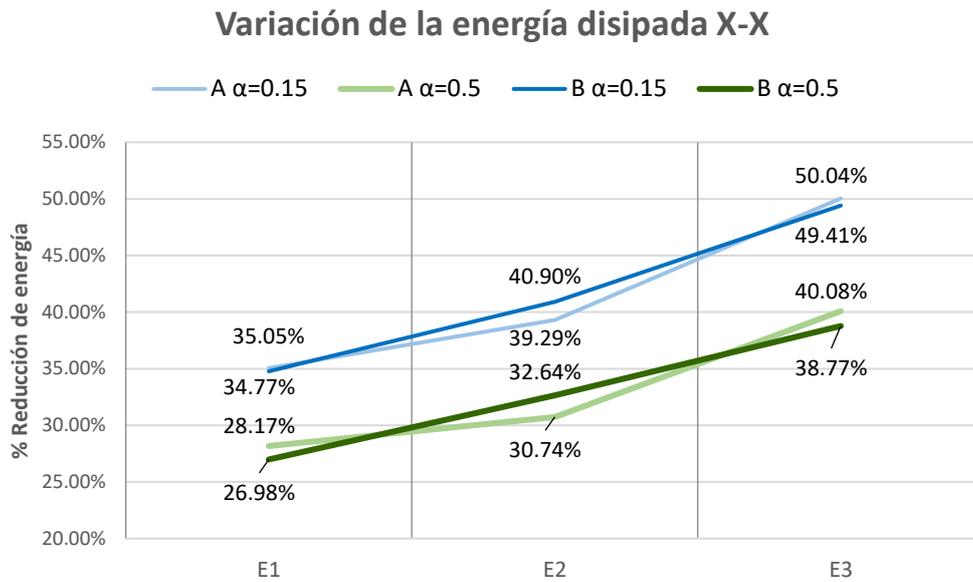
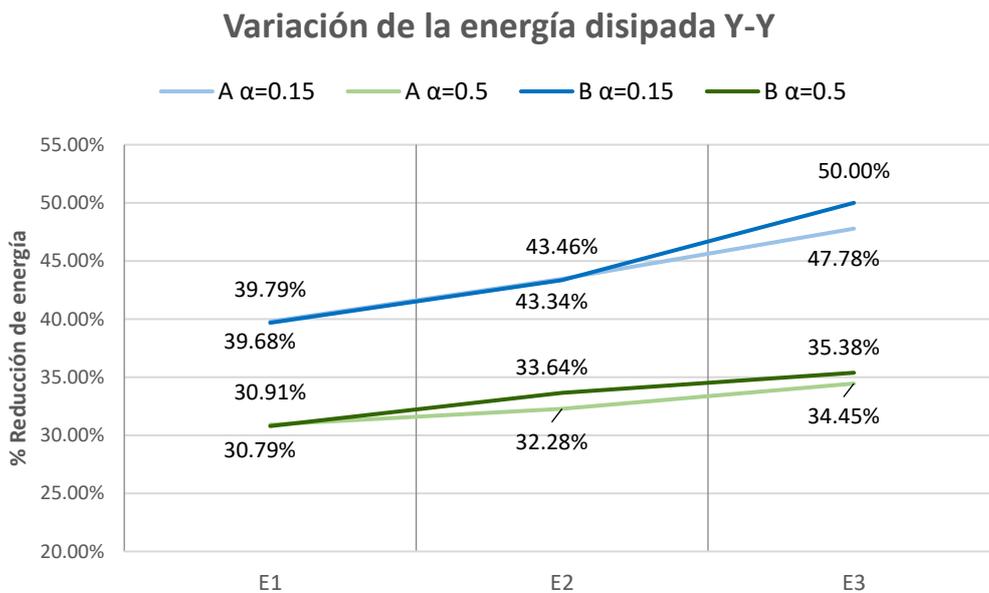


Gráfico 6.43 Resultados promedios en Variación de energía – Aislador A y B – Y-Y



El balance de energía de los aisladores disminuye en el sistema híbrido, mientras el valor de coeficiente es menor esta tendencia se acrecienta. La estructura E3 se presenta la mayor reducción, siendo 50.04% y 40.08% para los sistemas de $\alpha = 0.15$ y 0.5 respectivamente. Se presume que a mayores valores de amortiguamiento la tendencia se mantenga y se incremente la participación de los amortiguadores.

CAPÍTULO VII: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 Conclusiones

Respecto a resultados modales:

- El uso del sistema de aislamiento provee efectivizar el porcentaje de masa participante con la que reacciona la estructura. Este valor no sufre alteración si también empleamos el sistema híbrido de disipación de energía; por ende, no existe cambio sustancial de acuerdo a este punto de evaluación.
- El periodo estructural no tiene variación entre el sistema aislado y el híbrido. A pesar de que se restringe parte del desplazamiento en la base de la estructura, lo que se podría describir como quitarle parte de la flexibilización otorgada por el sistema aislado.

Respecto a la respuesta estructural del sistema híbrido:

- Se comprueba mediante los gráficos y valores que se mantiene cierta tendencia; el cual es la reducción de desplazamiento, el aumento de deriva y fuerza basal comparado con el sistema aislado.
- Logra la reducción de desplazamiento sacrificando el grado de respuesta de la edificación. No necesariamente cambia el desempeño, por lo que se considera que este sacrificio puede ser aceptable dependiendo de las condiciones. Se conserva el objetivo del diseño de protección sísmica en los valores de diseños definidos por la evaluación de eficiencia (E).
- Al restringir parte del desplazamiento se reduce la energía disipada por los dispositivos y parte de esta se tiene que disipar mediante la misma superestructura, lo que ocasiona una mayor respuesta en cuanto a valores de las derivas y aceleraciones.
- A medida del aumento del coeficiente de amortiguación la fuerza en los amortiguadores se incrementa, la cual se transmite a la superestructura causando el incremento de la fuerza cortante. La relación promedio que se tiene entre fuerzas basales para el valor de amortiguamiento promedio óptimo es de 1.09 en $E1$, 1.12 en $E2$ y 1.09 en $E3$ para el sistema con $\alpha = 0.15$; de 1.04 en $E1$, 1.05 en $E2$ y 1.03 en $E3$ para el sistema con $\alpha = 0.5$.
- La relación promedio que se tiene entre derivas del sistema híbrido para el valor de amortiguamiento promedio óptimo es de 1.12 en $E1$, 1.13 en $E2$ y 1.44 en $E3$ para el sistema con $\alpha = 0.15$; de 1.01 en $E1$, 1.08 en $E2$ y 1.14 en $E3$ para el sistema con $\alpha = 0.5$.

- El porcentaje de reducción del desplazamiento en la base para el amortiguamiento promedio óptimo es de 31.45% en $E1$, 36.45% en $E2$ y 42.12% en $E3$ para el sistema con $\alpha = 0.15$; de 24.90% en $E1$, 26.26% en $E2$ y 31.74% en $E3$ para el sistema con $\alpha = 0.5$.
- Las juntas entre edificaciones dependen de los desplazamientos, esto implica que este sistema es una alternativa cuando se quieran reducir estos valores. Considerando que para sistemas aislados son muy grandes, el sistema híbrido sería ideal para proyectos que tengan consideración importante en este criterio.

Respecto a la variación del coeficiente de velocidad:

- Los resultados presentan las mismas tendencias para las estructuras analizadas. En cuanto a la reducción del desplazamiento en la base el sistema con $\alpha = 0.15$ presenta una mayor reducción. Respecto a la deriva y fuerza basal este sistema presenta mayor crecimiento. Es decir, un valor de " α " menor nos otorga mayor reducción del desplazamiento, pero sacrificando de una mayor manera la respuesta estructural.

Respecto al análisis de Eficiencia (E):

- El cálculo del valor óptimo de " C " se realiza mediante el análisis de eficiencia, el cual plantea obtener un punto óptimo que relacione: la reducción del desplazamiento, el aumento de la deriva y de la fuerza basal. No se puede aumentar de manera sustancial el valor del amortiguamiento, esto sacrificaría el desempeño de la estructura hasta un punto indeseado.
- El gráfico de la eficiencia tiene un comportamiento similar para las tres estructuras, para el rango escogido el valor pico representa el coeficiente de amortiguación por dispositivo que nos otorga mejor comportamiento respecto a los demás.
- Existe una variación de la eficiencia respecto al coeficiente de velocidad, entre mayor sea " α " el coeficiente de amortiguación óptimo necesitado será mayor. La eficiencia del sistema con $\alpha = 0.5$ presenta un valor pico más alto comparado al de $\alpha = 0.15$. Esto significa en términos de eficiencia es más recomendable usar coeficientes de velocidad no tan bajos, esto depende de la flexibilidad de la estructura.
- Por fines prácticos se trabajó con el promedio de estos gráficos para presentar los resultados con el valor óptimo de $C = 25 \frac{\text{ton}\cdot\text{s}}{\text{m}}$ para cada dispositivo y $C_{global} = 400 \frac{\text{ton}\cdot\text{s}}{\text{m}}$ para la estructura completa.

- En el análisis de eficiencia los factores de importancia pueden variar según criterios del diseñador. Si en los resultados de un proyecto se ve que la variación de derivas no cambia el desempeño de las estructuras entonces no presentan limitaciones grandes y se puede tomar ventaja de diseños con mayores reducciones de desplazamientos. Para obtener el valor "C" de diseño en el análisis de eficiencia (E) se podría reducir el factor de importancia en las derivas y aumentar el de desplazamiento.
- En el análisis de eficiencia (E) se encuentra un pico característico para cada sistema estudiado, identificado como el sistema óptimo. Esto conlleva que la tendencia se mantenga para otras estructuras y así realizar diagramas para el diseño del amortiguador de fluido viscoso.

Respecto a la variación de la flexibilidad de las estructuras:

- Por cada estructura se observa que las más flexibles presentan un mayor coeficiente de amortiguamiento óptimo. Los valores picos de la eficiencia para los gráficos de $\alpha = 0.15$ se incrementan en estructuras más flexibles; por ello, para edificaciones con estas características pueden ser considerados valores bajos de coeficiente de velocidad.

Respecto a la Fuerza Restitutiva del sistema híbrido:

- En el sistema híbrido la capacidad de restitución del sistema de aislamiento disminuye, este comportamiento está presente en las tres estructuras. Es un punto crítico que desfavorece a este sistema y se debe considerar que la reducción no sea menor a lo recomendado en la norma tal como sucede en la estructura $E3$. Sin embargo, en este análisis no está considerado la capacidad restitutiva proporcionada por los amortiguadores de fluido viscoso.

Respecto al balance de energía en los aisladores:

- El comportamiento histerético de los aisladores varía, dando como resultado la disminución de la disipación energética de estos dispositivos mientras que la de los amortiguadores aumenta. La máxima reducción de la energía en el aislador A es de 48.91% en $E3$ para el sistema con $\alpha = 0.15$; 37.27% en $E3$ para el sistema con $\alpha = 0.5$. En el caso del aislador B es 49.71% en $E3$ para el sistema con $\alpha = 0.15$; de 37.08% en $E3$ para el sistema con $\alpha = 0.5$.

- El cambio en el balance energético contribuye al concepto de variación de los aisladores utilizado. No solo respecto a las dimensiones, lo que reduciría costos, sino a la amortiguación que se provee a estos dispositivos.

El sistema híbrido es una gran opción para situaciones específicas, en las cuales la reducción de desplazamiento sea prioritaria. En el presente proyecto los desplazamientos no son muy grandes, por lo que para la zona analizada no es recomendable su uso.

7.2 Recomendaciones

Desarrollar el análisis de eficiencia para distintos tipos de estructuras, considerando diferentes factores de importancia y distintos valores de " α ".

Realizar un estudio de cuantificación del cambio de dimensionamiento y amortiguación de los aisladores.

Realizar el estudio para zonas de suelo malo con los desplazamientos superiores a 60 cm. Un modelamiento para una estructura de diferentes características ampliará las alternativas para definir el diseño del sistema híbrido de disipación de energía y analizar en que situaciones mejora su viabilidad.

Realizar el estudio para el diseño estructural de los elementos que componen el sistema híbrido; ya que, solo se estudió la variación del comportamiento de esta estructura.

Realizar un análisis de costo – beneficio para el uso de este sistema. Implica el costo del adiconamiento de los amortiguadores de fluido viscoso, el ahorro en cuanto a la reducción de la junta estructural y la posible variación en el dimensionamiento de los aisladores.

Realizar el estudio de la contribución a la fuerza restitutiva que proporcionan los amortiguadores de fluido viscoso.

BIBLIOGRAFÍA

- Ahumada, V. L. (2010). *Sistemas de control en Estructuras*. Colombia.
- American Society of Civil Engineers. ASCE-SEI. (2016). *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*. Capítulo 17-18. Reston, Virginia: American Society of Civil Engineers.
- Andrade, L., Tuxworth, J. (2009). *Seismic Protection of Structures with Modern Base Isolation Technologies*. Paper 7a-3, Concrete Solutions.
- Asher, J. W., Young, R. P., Ewing, R. D. (1996). *Seismic Isolation Design of the San Bernardino County Medical Center*. Journal Structural Design of Tall Buildings. Estados Unidos: CUC
- ATC 17-1. (1993). *Proceedings on seismic isolation, passive energy dissipation and active control*. Redwood City, Estados Unidos: Appl Tech. Council
- Barmo, A., Mualla, I. H., Hasan, H. T. (2014). *The Behavior of Multi-Story Buildings Seismically Isolated System Hybrid Isolation*. Damascus, Syria: Scientific Research Publishing.
- Cámara Chilena de la Construcción. (2011). *Protección Sísmica de Estructuras*. Chile: Corporación de desarrollo tecnológico.
- Chopra, A. K. (2016). *Dynamics of Structures Theory and Applications to Earthquake Engineering*. (5ta Edición) Estados Unidos: Prentice Hall.
- Computers, C. and Structures, I. (2015). *Analysis reference manual for sap2000, etabs, safe and csbridge*.
- Dynamic Isolation Systems. *Uplift or Tension in Isolators*. Estados Unidos: Dynamic Isolation Systems Inc.
- Federal Emergency Management Agency. FEMA-273. (1997). *NEHRP guidelines for the seismic rehabilitation of buildings*.
- Federal Emergency Management Agency. FEMA P-750. (2009). *NEHRP Recommended Seismic Provisions for New Buildings and Other Structures*.
- Federal Emergency Management Agency. FEMA P-751. (2012). *Seismically Isolated Structures*.
- Federal Emergency Management Agency. FEMA P-1050. (2015). *Recommended Seismic Provisions for New Buildings and Other Structures*.
- HAZUS-MH 2.1 (2015). *Multi-hazard Loss Estimation Methodology: Earthquake Model*. Washington, Estados Unidos: Federal Emergency Management Agency.
- Higashino, M., Okamoto, S. (2006). *Response Control and Seismic Isolation of Buildings*. N.Y., Estados Unidos: Taylor and Francis.
- Hussain, S., Lee, D., Retamal, E. (1995). *Viscous Dampinf for Base Isolated Structures*.
- Hussain, S., Mohamed, A. S. (2008). *Design of a Seismic Isolation System with Supplemental Viscoues Damping for a Near-Fault Essential Services Facility*. Beijing, China: World Conference on Earthquake Engineering.
- Hwang, J. S. (2002). *Seismic Design of Structures with Viscous Dampers*.

- Kelly, J. M. (1997). *Earthquake-resistant design with rubber*. (2da Edición). London. Springer-Verlag
- Kelly, J.M. (1999). *The Role of Damping in Seismic Isolation*. Estados Unidos: Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Richmond, CA.
- Kelly, T. (2001). *Base Isolation of Structures*. Nueva Zelanda: Holmes Consulting.
- Makris, N. (1997). Rigidity-plasticity-viscosity: *Can eletro-rheological dampers protect base isolated structures from near-source ground motions*. Earthquake Engineering and Structural Dynamics
- Mualla, I. H. (2000). *Experimental Evaluation of New Friction Damper*. Dinamarca. Technical University of Denmark
- Muñoz, A. (2016). *Sistemas Modernos de Protección Sísmica de Edificios*. PUCP
- Naeim, F., Kelly, J. (1999). *Design of Seismic Isolated Structures: From Theory to Practice*. Estados Unidos: Jhon Wiley & Sons Inc.
- Nagarajaiah, S., Ferrell, K. (1999). *Stability of Elastomeric Seismic Isolation Bearing*. Journal of Structural Engineering
- Providakis, C.P. (2007). Effect of LRB Isolators and Supplemental Viscous Dampers on Seismic Isolated Buildings under Near-Fault Excitations. Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Elsevier.
- Riley, M. A., Reinhorn. A. M., Nagarajaiah, S. (1998). *Implementation issues and of a hybrid sliding isolation*. Nueva York, Estados Unidos: Elsevier.
- Ruiz, P. (1974). *Dinámica de Estructuras*. Santiago, Chile: Universidad Católica de Chile.
- Shanmuga, P. D., Cinitha A., Umesha P. K, Nagesh, R. I. (2014). *Enhancing the Seismic Response of Buildings with Energy Dissipation Methods*. Chennai, India: CSIR - Structural Engineering Research Centre.
- Shcellenber, A. (2014). *Modelling Seismic Isolation and Viscous Damping*. Pacific Earthquake Engineering Research Center.
- Skinner, I. R., Kelly, T. E., Robinson, B. (2011). *Seismic Isolation for Designers and Structural Engineers*. Wellington, Nueva Zelanda: Robinson Seismic Ltd.: Holmes Consulting Group
- Soong, T. T., Spencer Jr, B. F. (2002). *Supplemental energy dissipation: state-of-art and state-of-the-practice*. N.Y. EEUU. Engineering Structures
- Taboada, D. (2018). Respuesta Sísmica de un Edificio con Sistema de Aislamiento y Amortiguadores Viscosos Complementarios para la Sismicidad Peruana. Tesis PUCP.
- Taylor Devices (1999). *Buildings: Design for Damping*. Nueva York, EE. UU.
- Taylor, D. (2000). *History, Design and Applications of Fluid Dampers in Structural Engineering*. North Tonawanda: Taylor Devices, Inc.
- Taylor Devices. (2004). *Fluid Dampers for Aplications of Seismic Isolation*. Taylor Devices, Inc.

Taylor Devices. (2020). *Fluid Viscous Dampers - General Guidelines for Engineers*. Estados Unidos: Taylor Devices Inc.

Thompson, A., Whittaker, A., Fenves, G., Mahin, S. (2015). Property Modification Factors of Elastomeric Seismic Isolation Bearing. Nueva York, Estados Unidos: World Conference on Earthquake Engineering.

Wilson, E. L., Kiureghian, A., Bayo, E. P. (1981). *A Replacement for the SRSS Method in Seismic Analysis*. EEUU: Earthquake Engineering and Structural Dynamics.

Zhou, X. Y., Yu, R. F., Dong, L. (2004). The Complex-Complete-Quadratic-Combination (CCQC) Method for Seismic Response of Non-Classically Damped Linear System. Vancouver, Canadá: World Conference on Earthquake Engineering.



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**ANÁLISIS Y MODELAMIENTO DE UN SISTEMA HÍBRIDO DE
DISIPACIÓN DE ENERGÍA: AISLADORES SÍSMICOS CON
AMORTIGUADORES EN BASE**

ANEXOS

Tesis para optar el título profesional de Ingeniero Civil

AUTOR:

JAVIER ANTARES QUISPE VILCHES

ASESOR:

MAG. ING. CHRISTIAN ALBERTO ASMAT GARAYCOCHEA

Lima, Julio del 2021

ANEXOS

ANEXO A: Propiedades no lineales de los aisladores A y B para el diseño Límite Superior, Nominal y Límite inferior.....	1
ANEXO B: Modelos bilineales del Sistema de Aislamiento para diseño Límite Superior, Nominal y Límite inferior.....	2
ANEXO C: Resultados modales de los Sistemas Aislados y Sistemas Híbridos para diseño Límite Superior, Nominal y Límite inferior.....	3
ANEXO D: Cargas verticales en servicio en los aisladores del Sistema aislado para el diseño Nominal.....	5
ANEXO E: Diagramas histéresis del Sistema Aislado correspondientes al Análisis no lineal Tiempo-Historia para el diseño del Límite superior.....	7
ANEXO F: Diagramas histéresis del Sistema Aislado correspondientes al Análisis no lineal Tiempo-Historia para el diseño del Límite inferior.....	8
ANEXO G: Diagramas histéresis de los aisladores en el Sistema Aislado correspondientes al Análisis no lineal Tiempo-Historia para el diseño del Límite inferior.....	9
ANEXO H: Diagramas histéresis de los aisladores en el Sistema Aislado correspondientes al Análisis no lineal Tiempo-Historia para el diseño del Límite superior.....	11
ANEXO I: Diagramas histéresis de los aisladores en los Sistemas Híbridos correspondientes al Análisis no lineal Tiempo-Historia para el diseño del Límite inferior.....	13
ANEXO J: Variables para la evaluación de eficiencia tomados del Análisis no lineal Tiempo-Historia.....	16
ANEXO K: Derivas inelásticas del Análisis no lineal Tiempo-Historia para todos los sistemas para el diseño del Límite superior.....	19
ANEXO L: Desplazamientos del Análisis no lineal Tiempo-Historia para todos los sistemas para el diseño del Límite inferior.....	22
ANEXO M: Aceleraciones del Análisis no lineal Tiempo-Historia para todos los sistemas para el diseño del Límite superior.....	25
ANEXO N: Diagramas histéresis de los amortiguadores en los Sistemas Híbridos - Análisis no lineal Tiempo-Historia para el diseño del Límite inferior.....	28
ANEXO O: Razones de cambio de las gráficas Fuerza Basal, Derivas y reducción de Desplazamiento para distintos valores de “ α ”.....	30
ANEXO P: Reducción de disipación de energía en el Sistema Híbrido de los aisladores A y B – Límite inferior.....	33

ANEXO A: Propiedades no lineales de los aisladores A y B para diseño Límite Superior, Nominal y Límite Inferior

Tabla A.1 Propiedades no lineales modificadas para el sistema aislado (E1)

ESTRUCTURA 1	Aislador A			Aislador B		
	Límite superior	Nominal	Límite inferior	Límite superior	Nominal	Límite inferior
K1 o Ke (ton/m)	905	815	596	1252	1129	824
K2 o Kd (ton/m)	90.5	81.5	59.6	125.2	112.9	82.4
K1/K2	10	10	10	10	10	10
Qd (ton)	13.3	8.9	7.1	18.4	12.3	9.8
Fy (ton)	14.7	9.9	7.8	20.4	13.6	10.9
Fmáx (ton)	33.7	32.6	27.5	46.6	45.2	38.1
Keff (ton/m)	149	112	80	207	155	111
Ceff (ton s/m)	24.6	15.6	12.2	24.6	15.6	12.2
DM (cm)	20.5	26.2	30.6	20.5	26.2	30.6
D'M (cm)	19.6	25.3	29.9	19.6	25.3	29.9
DTM (cm)	22.6	29.1	34.4	22.9	29.3	34.4
N (#aisladores)	24	24	24	18	18	18
W (ton)	140	140	140	250	250	250
W/Qd (%)	9.5%	6.3%	5.0%	7.3%	4.9%	3.9%
Pu máx (ton)	360	360	360	430	430	430

Tabla A.2 Propiedades no lineales modificadas para el sistema aislado (E2)

ESTRUCTURA 2	Aislador A			Aislador B		
	Límite superior	Nominal	Límite inferior	Límite superior	Nominal	Límite inferior
K1 o Ke (ton/m)	789	606	485	1116	857	686
K2 o Kd (ton/m)	78.9	60.6	48.5	111.6	85.7	68.6
K1/K2	10	10	10	10	10	10
Qd (ton)	10.9	7.2	5.8	15.4	10.3	8.2
Fy (ton)	12.1	8.1	6.5	17.1	11.4	9.1
Fmáx (ton)	33.2	27.8	22.5	47.0	39.3	31.9
Keff (ton/m)	117	82	65	166	116	92
Ceff (ton s/m)	20.0	13.4	11.9	20.0	13.4	11.9
DM (cm)	25.4	30.4	30.5	25.4	30.4	30.5
D'M (cm)	24.6	29.3	30.0	24.6	29.3	30.0
DTM (cm)	28.3	33.9	34.5	29.3	35.1	35.2
N (#aisladores)	20	20	20	18	18	18
W (ton)	180	180	180	260	260	260
W/Qd (%)	6.0%	4.0%	3.2%	5.9%	3.9%	3.2%
Pu máx (ton)	360	360	360	450	450	450

Tabla A.3 Propiedades no lineales modificadas para el sistema aislado (E3)

ESTRUCTURA 3	Aislador A			Aislador B		
	Límite superior	Nominal	Límite inferior	Límite superior	Nominal	Límite inferior
K1 o Ke (ton/m)	553	424	339	797	611	489
K2 o Kd (ton/m)	55.3	42.4	33.9	79.7	61.1	48.9
K1/K2	10	10	10	10	10	10
Qd (ton)	11.9	8.0	6.4	17.2	11.5	9.2
Fy (ton)	13.2	8.9	7.1	19.1	12.8	10.2
Fmáx (ton)	28.4	21.2	17.0	40.9	30.6	24.4
Keff (ton/m)	95	68	54	138	98	78
Ceff (ton s/m)	25.6	19.2	17.7	25.6	19.2	17.7
DM (cm)	26.3	27.1	27.1	26.3	27.1	27.1
D'M (cm)	25.8	26.2	26.8	25.8	26.2	26.8
DTM (cm)	29.7	31.2	31.2	30.4	31.3	31.3
N (#aisladores)	20	20	20	18	18	18
W (ton)	210	210	210	300	300	300
W/Qd (%)	5.7%	3.8%	3.0%	5.7%	3.8%	3.1%
Pu máx (ton)	480	480	480	600	600	600

ANEXO B: Modelos bilineales del Sistema de Aislamiento para diseño Límite Superior, Nominal y Límite Inferior

Modelo bilineal del sistema (E1)

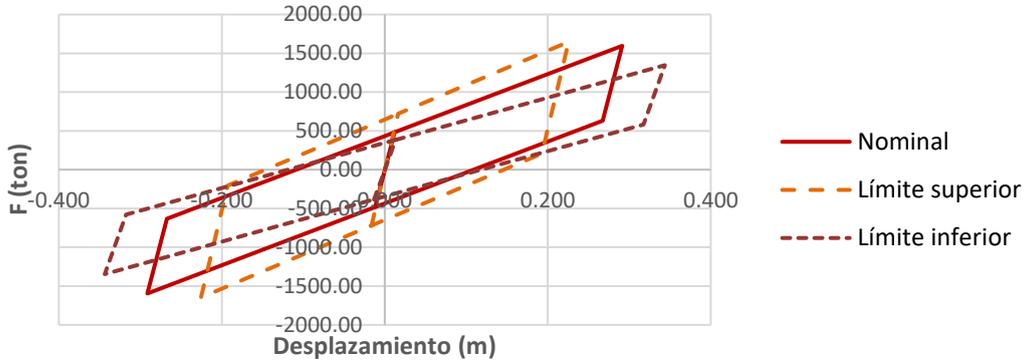


Gráfico B.1 Modelo bilineal con propiedades modificadas para el sistema aislado (E1)

Modelo bilineal del sistema (E2)

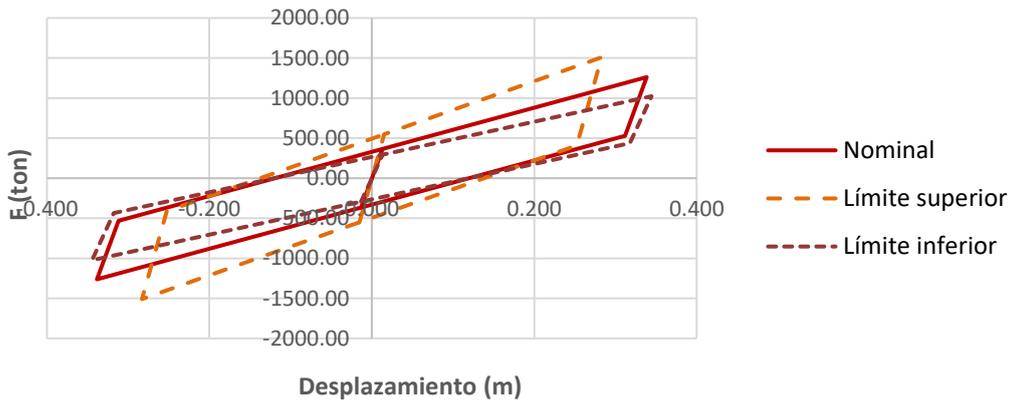


Gráfico B.2 Modelo bilineal con propiedades modificadas para el sistema aislado (E2)

Modelo bilineal del sistema (E3)

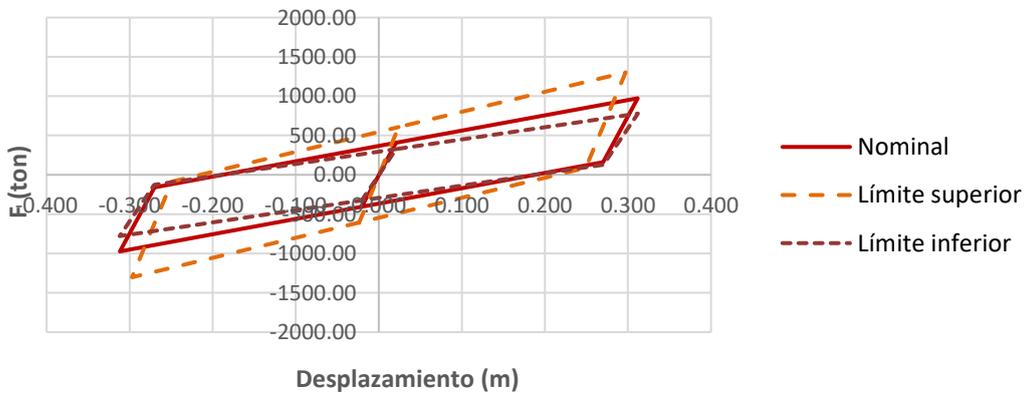


Gráfico B.3 Modelo bilineal con propiedades modificadas para el sistema aislado (E3)

ANEXO C: Resultados modales de los Sistemas Aislados y Sistemas Híbridos para diseño Límite Superior, Nominal y Límite Inferior

Tabla C.1 Periodo y masa participante acumulada – Sistema Aislado (E1)

Estructura 1 - Sistema Aislado												
Modo	Nominal				Límite superior				Límite inferior			
	Periodo (s)	Masa participante			Periodo (s)	Masa participante			Periodo (s)	Masa participante		
		ΣX (%)	ΣY (%)	ΣZ (%)		ΣX (%)	ΣY (%)	ΣZ (%)		ΣX (%)	ΣY (%)	ΣZ (%)
1	2.29	3.66%	93.10%	3.10%	2.00	5.10%	91.69%	2.97%	2.68	2.36%	94.32%	3.25%
2	2.28	99.76%	96.86%	3.10%	1.99	99.61%	96.94%	2.97%	2.68	99.87%	96.74%	3.25%
3	2.13	99.87%	99.86%	99.94%	1.86	99.77%	99.75%	99.90%	2.51	99.93%	99.93%	99.97%
4	0.37	99.91%	99.95%	99.95%	0.37	99.84%	99.91%	99.91%	0.37	99.95%	99.97%	99.97%
5	0.36	100.00%	100.00%	99.95%	0.36	99.99%	99.99%	99.92%	0.36	100.00%	100.00%	99.98%

Tabla C.2 Periodo y masa participante acumulada – Sistema Aislado (E2)

Estructura 2 - Sistema Aislado												
Modo	Nominal				Límite superior				Límite inferior			
	Periodo (s)	Masa participante			Periodo (s)	Masa participante			Periodo (s)	Masa participante		
		ΣX (%)	ΣY (%)	ΣZ (%)		ΣX (%)	ΣY (%)	ΣZ (%)		ΣX (%)	ΣY (%)	ΣZ (%)
1	2.81	0.43%	84.98%	14.63%	2.36	1.88%	85.23%	13.95%	3.12	0.28%	86.43%	14.27%
2	2.78	99.77%	85.41%	14.64%	2.34	99.75%	87.15%	14.02%	3.09	99.95%	86.69%	14.31%
3	2.69	99.90%	99.81%	99.85%	2.26	99.85%	99.65%	99.82%	2.99	99.95%	99.94%	99.76%
4	0.43	99.90%	99.92%	99.95%	0.40	99.93%	99.69%	99.88%	0.41	99.98%	99.95%	99.78%
5	0.42	100.00%	99.92%	99.95%	0.37	99.97%	99.79%	99.88%	0.37	99.99%	99.99%	99.78%

Tabla C.3 Periodo y masa participante acumulada – Sistema Aislado (E3)

Estructura 3 - Sistema Aislado												
Modo	Nominal				Límite superior				Límite inferior			
	Periodo (s)	Masa participante			Periodo (s)	Masa participante			Periodo (s)	Masa participante		
		ΣX (%)	ΣY (%)	ΣZ (%)		ΣX (%)	ΣY (%)	ΣZ (%)		ΣX (%)	ΣY (%)	ΣZ (%)
1	3.55	0.50%	86.43%	15.13%	3.03	0.46%	87.30%	15.70%	3.95	0.52%	85.78%	16.65%
2	3.52	99.74%	87.09%	15.14%	3.01	99.64%	87.92%	15.71%	3.92	99.77%	86.45%	16.65%
3	3.41	99.91%	99.81%	99.82%	2.91	99.82%	99.80%	99.85%	3.79	99.94%	99.93%	99.98%
4	0.53	99.91%	99.92%	99.82%	0.52	99.82%	99.99%	99.85%	0.53	99.94%	100.00%	99.98%
5	0.51	100.00%	99.92%	99.92%	0.51	99.99%	99.99%	99.85%	0.51	100.00%	100.00%	99.98%

Tabla C.4 Periodo y masa participante acumulada – Sistema Híbrido (E1)

Estructura 1 - Sistema Híbrido $\alpha=0.15$ y 0.5												
Modo	Nominal				Límite superior				Límite inferior			
	Periodo (s)	Masa participante			Periodo (s)	Masa participante			Periodo (s)	Masa participante		
		ΣX (%)	ΣY (%)	ΣZ (%)		ΣX (%)	ΣY (%)	ΣZ (%)		ΣX (%)	ΣY (%)	ΣZ (%)
1	2.29	3.66%	93.10%	3.10%	2.00	5.10%	91.69%	2.97%	2.68	2.36%	94.32%	3.25%
2	2.28	99.76%	96.86%	3.10%	1.99	99.61%	96.94%	2.97%	2.68	99.87%	96.74%	3.25%
3	2.13	99.87%	99.86%	99.94%	1.86	99.77%	99.75%	99.90%	2.51	99.93%	99.93%	99.97%
4	0.37	99.91%	99.95%	99.95%	0.37	99.84%	99.91%	99.91%	0.37	99.95%	99.97%	99.97%
5	0.36	100.00%	100.00%	99.95%	0.36	99.99%	99.99%	99.92%	0.36	100.00%	100.00%	99.98%

Tabla C.5 Periodo y masa participante acumulada – Sistema Híbrido (E2)

Estructura 2 - Sistema Híbrido $\alpha=0.15$ y 0.5												
Modo	Nominal				Límite superior				Límite inferior			
	Periodo (s)	Masa participante			Periodo (s)	Masa participante			Periodo (s)	Masa participante		
		ΣX (%)	ΣY (%)	ΣZ (%)		ΣX (%)	ΣY (%)	ΣZ (%)		ΣX (%)	ΣY (%)	ΣZ (%)
1	2.81	0.43%	84.98%	14.63%	2.36	1.88%	85.23%	13.95%	3.12	0.28%	86.43%	14.27%
2	2.78	99.77%	85.41%	14.64%	2.34	99.75%	87.15%	14.02%	3.09	99.95%	86.69%	14.31%
3	2.69	99.90%	99.81%	99.85%	2.26	99.85%	99.65%	99.82%	2.99	99.95%	99.94%	99.76%
4	0.43	99.90%	99.92%	99.95%	0.40	99.93%	99.69%	99.88%	0.41	99.98%	99.95%	99.78%
5	0.42	100.00%	99.92%	99.95%	0.37	99.97%	99.79%	99.88%	0.37	99.99%	99.99%	99.78%

Tabla C.6 Periodo y masa participante acumulada – Sistema Híbrido (E3)

Estructura 3 - Sistema Híbrido $\alpha=0.15$ y 0.5												
Modo	Nominal				Límite superior				Límite inferior			
	Periodo (s)	Masa participante			Periodo (s)	Masa participante			Periodo (s)	Masa participante		
		ΣX (%)	ΣY (%)	ΣZ (%)		ΣX (%)	ΣY (%)	ΣZ (%)		ΣX (%)	ΣY (%)	ΣZ (%)
1	3.55	0.50%	86.43%	15.13%	3.03	0.46%	87.30%	15.70%	3.95	0.52%	85.78%	16.65%
2	3.52	99.74%	87.09%	15.14%	3.01	99.64%	87.92%	15.71%	3.92	99.77%	86.45%	16.65%
3	3.41	99.91%	99.81%	99.82%	2.91	99.82%	99.80%	99.85%	3.79	99.94%	99.93%	99.98%
4	0.53	99.91%	99.92%	99.82%	0.52	99.82%	99.99%	99.85%	0.53	99.94%	100.00%	99.98%
5	0.51	100.00%	99.92%	99.92%	0.51	99.99%	99.99%	99.85%	0.51	100.00%	100.00%	99.98%



**ANEXO D: Cargas verticales en servicio en los aisladores en el Sistema Aislado
para el diseño Nominal**

Tabla D.1 Cargas verticales en servicio CM+CV – Sistema Aislado (E1)

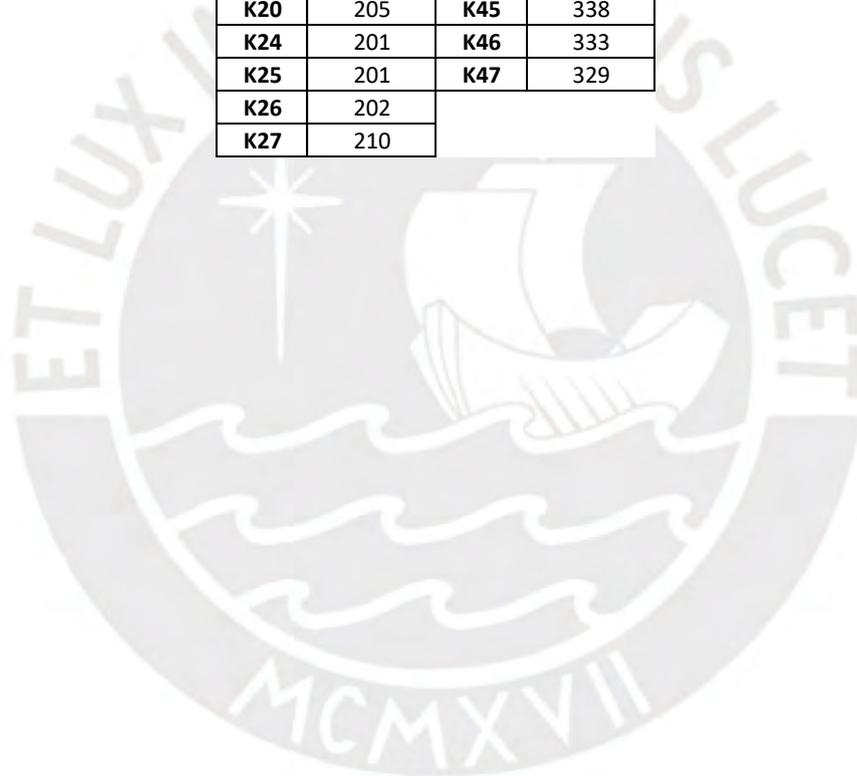
CARGAS EN SERVICIO E1 (ton)			
K1	69	K29	244
K2	71	K30	246
K3	131	K31	243
K4	139	K32	243
K5	139	K33	246
K6	131	K34	245
K7	72	K35	168
K8	75	K36	117
K9	75	K37	197
K10	133	K39	246
K11	140	K40	245
K12	140	K41	168
K13	133	K42	118
K14	75	K43	197
K15	75	K44	244
K16	69	K45	246
K17	133	K46	244
K18	139	K47	243
K19	139		
K20	133		
K24	133		
K25	138		
K26	139		
K27	131		

Tabla D.2 Cargas verticales en servicio CM+CV – Sistema Aislado (E2)

CARGAS EN SERVICIO E2 (ton)			
K1	135	K29	254
K2	89	K30	254
K3	154	K31	251
K4	148	K32	251
K5	148	K33	255
K6	148	K34	254
K7	106	K35	175
K8	89	K36	129
K10	149	K37	202
K11	150	K39	255
K12	150	K40	254
K13	149	K41	175
K17	149	K42	129
K18	148	K43	202
K19	148	K44	252
K20	152	K45	254
K24	150	K46	251
K25	148	K47	250
K26	148		
K27	174		

Tabla D.3 Cargas verticales en servicio CM+CV – Sistema Aislado (E3)

CARGAS EN SERVICIO E3 (ton)			
K1	188	K29	336
K2	121	K30	338
K3	208	K31	333
K4	202	K32	330
K5	201	K33	339
K6	199	K34	339
K7	147	K35	234
K8	121	K36	180
K10	200	K37	268
K11	201	K39	338
K12	201	K40	339
K13	200	K41	234
K17	200	K42	179
K18	201	K43	268
K19	201	K44	333
K20	205	K45	338
K24	201	K46	333
K25	201	K47	329
K26	202		
K27	210		



ANEXO E: Diagramas histéresis del Sistema Aislado correspondientes al Análisis no lineal Tiempo-Historia para el diseño del Límite superior

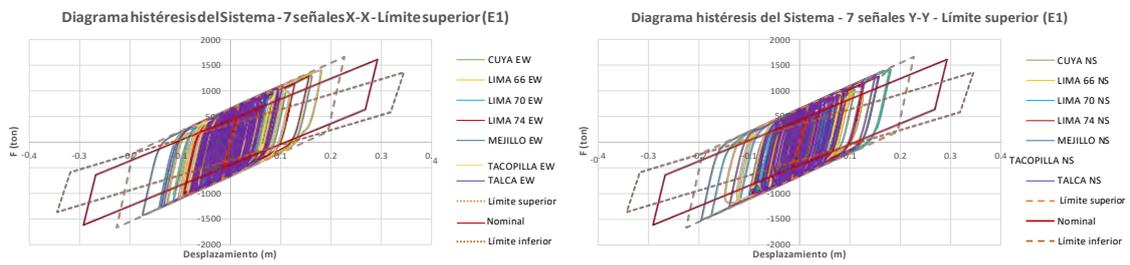


Figura E.1 Diagramas histéresis del Sistema de asilamiento - Límite Superior - E1

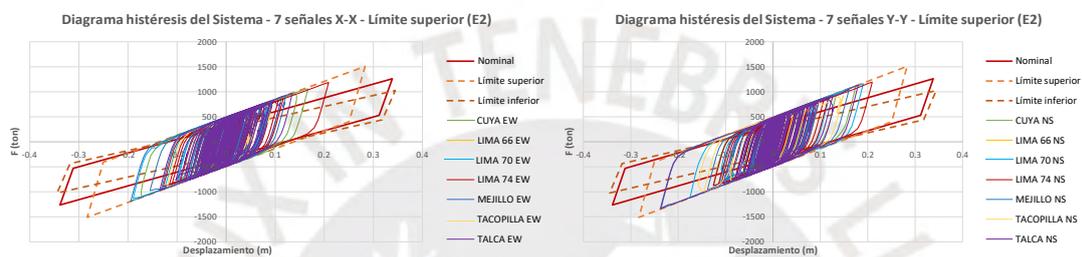


Figura E.2 Diagramas histéresis del Sistema de asilamiento - Límite Superior - E2

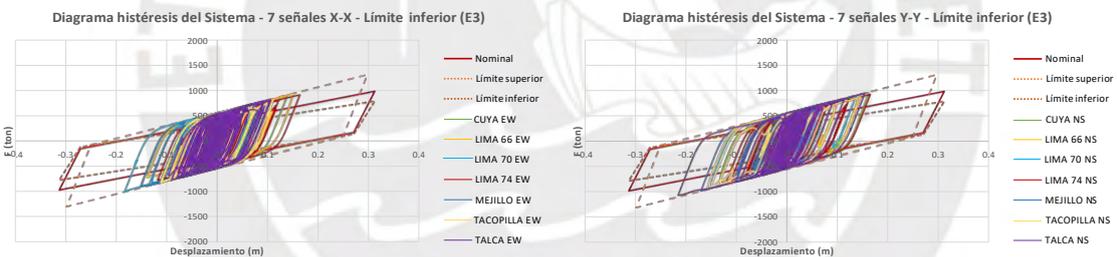


Figura E.3 Diagramas histéresis del Sistema de asilamiento - Límite Superior - E3

ANEXO F: Diagramas histéresis del Sistema Aislado correspondientes al Análisis no lineal Tiempo-Historia para el diseño del Límite inferior

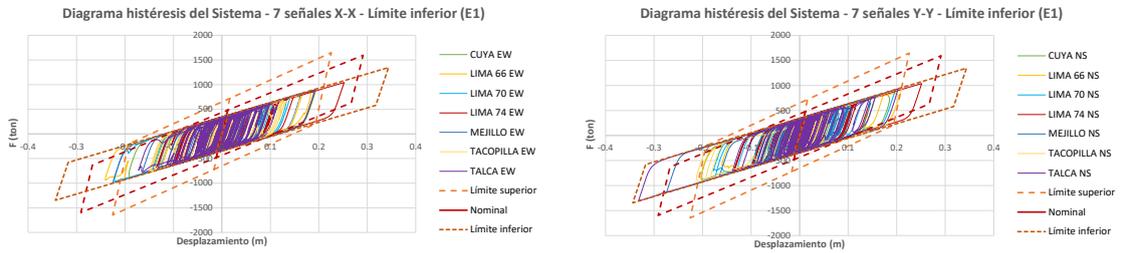


Figura F.1 Diagramas histéresis del Sistema de asilamiento - Límite Inferior - E1

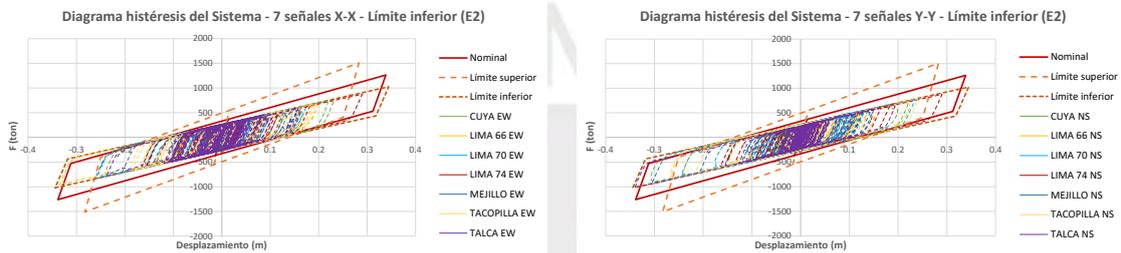


Figura F.2 Diagramas histéresis del Sistema de asilamiento - Límite Inferior – E2

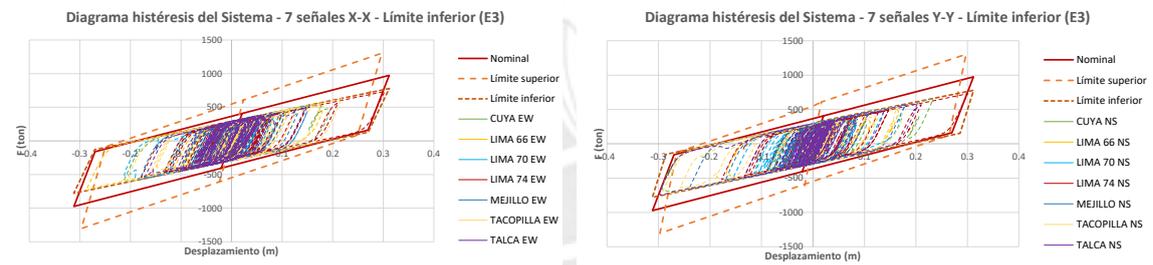


Figura F.3 Diagramas histéresis del Sistema de asilamiento - Límite Inferior – E3

ANEXO G: Diagramas histéresis de los aisladores en el Sistema Aislado correspondientes al Análisis no lineal Tiempo-Historia para el diseño del Límite inferior

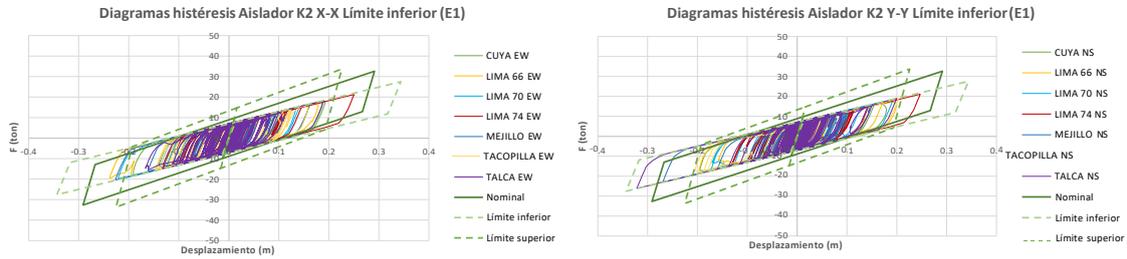


Figura G.1 Diagramas histéresis - 7 sismos - Aislador K2 - Límite Inferior - E1

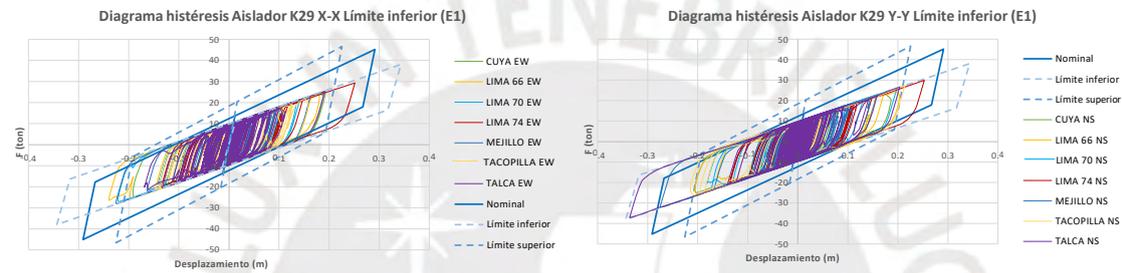


Figura G.2 Diagramas histéresis - 7 sismos - Aislador K29 - Límite Inferior - E1

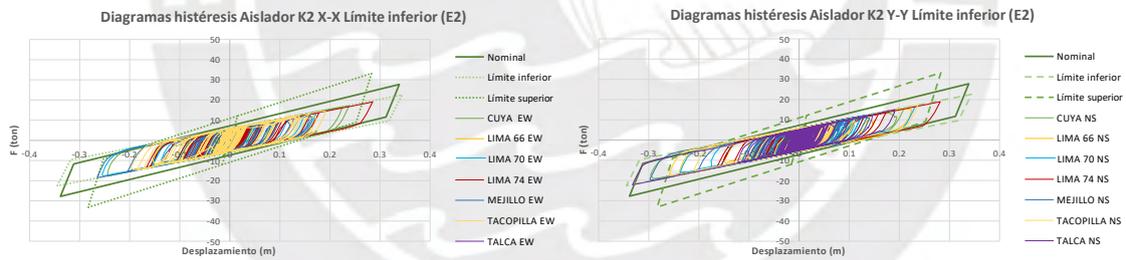


Figura G.3 Diagramas histéresis - 7 sismos - Aislador K2 - Límite Inferior - E2

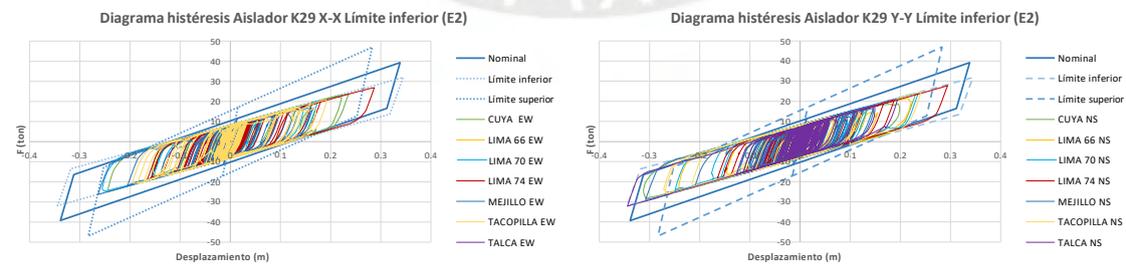


Figura G.4 Diagramas histéresis - 7 sismos - Aislador K29 - Límite Inferior - E2

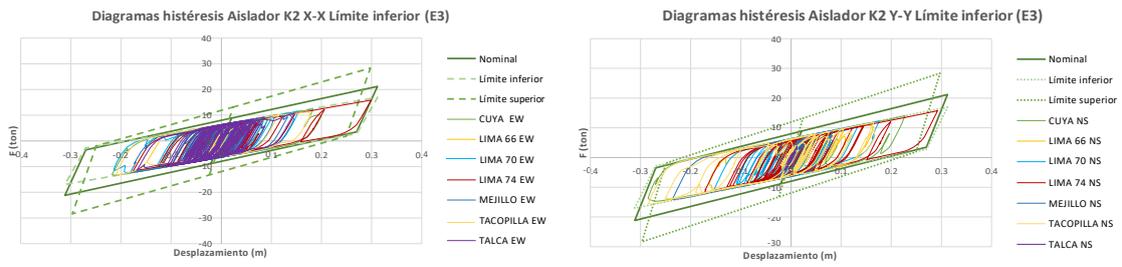


Figura G.5 Diagramas histéresis - 7 sismos - Aislador K2 - Límite Inferior - E3

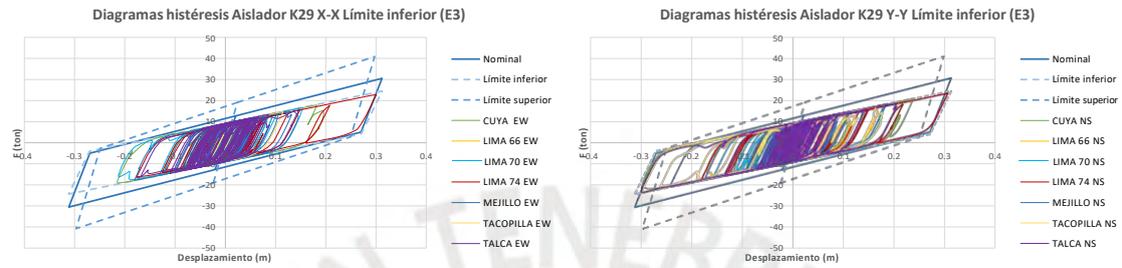


Figura G.6 Diagramas histéresis - 7 sismos - Aislador K29 - Límite Inferior - E3



ANEXO H: Diagramas histéresis de los aisladores en el Sistema Aislado correspondientes al Análisis no lineal Tiempo-Historia para el diseño del Límite superior

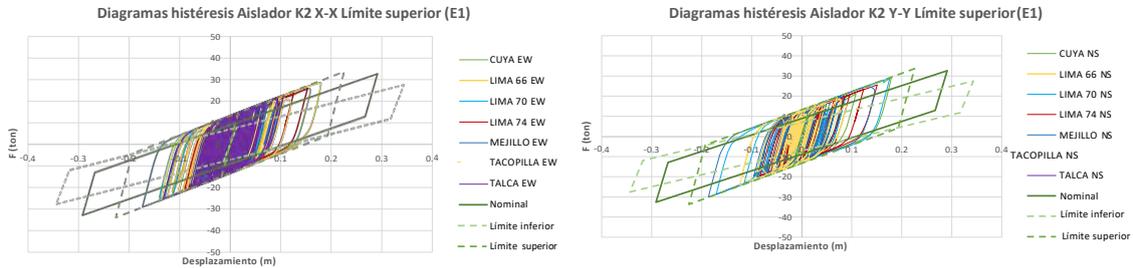


Figura H.1 Diagramas histéresis - 7 sismos - Aislador K2 - Límite Superior - E1

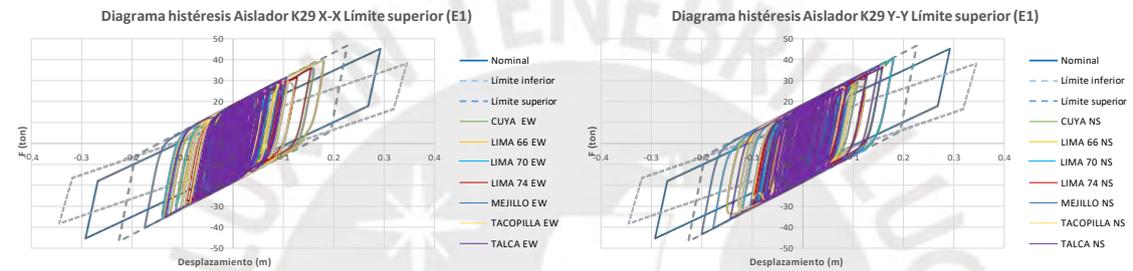


Figura H.2 Diagramas histéresis - 7 sismos - Aislador K29 - Límite Superior - E1

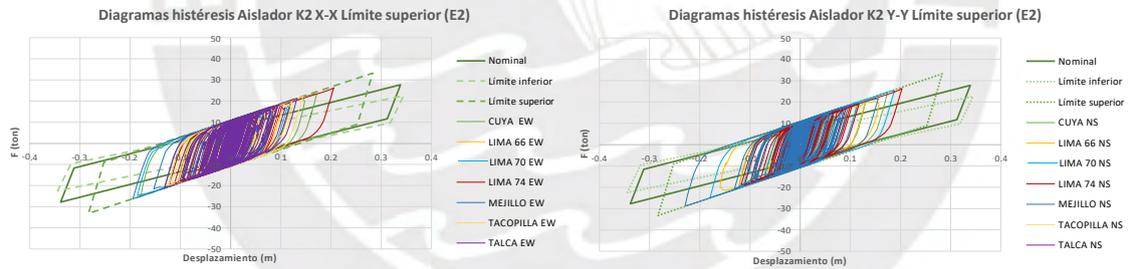


Figura H.3 Diagramas histéresis - 7 sismos - Aislador K2 - Límite Superior - E2

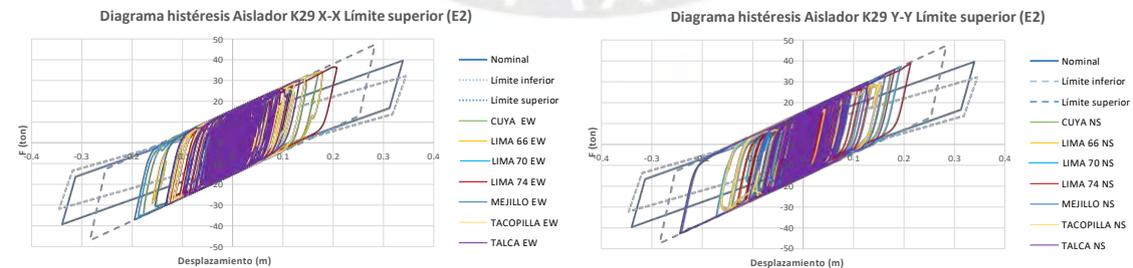


Figura H.4 Diagramas histéresis - 7 sismos - Aislador K29 - Límite Superior - E2

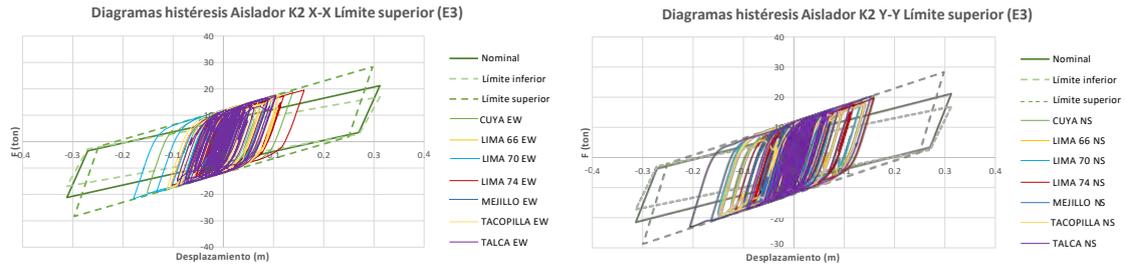


Figura H.5 Diagramas histéresis - 7 sismos - Aislador K2 - Límite Superior - E3

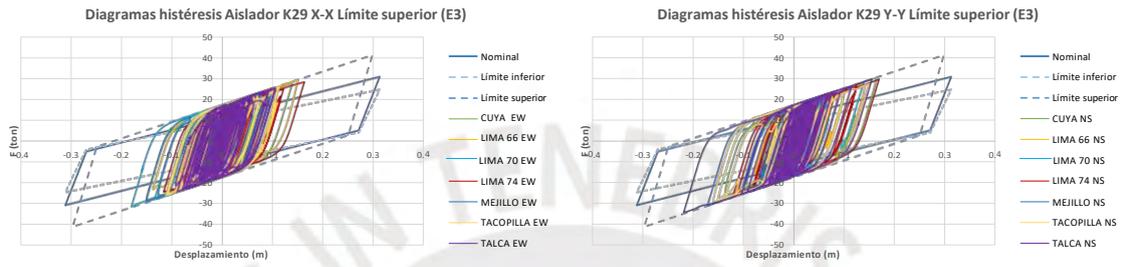


Figura H.6 Diagramas histéresis - 7 sismos - Aislador K29 - Límite Superior - E3



ANEXO I: Diagramas histéresis de los aisladores en los Sistemas Híbridos correspondientes al Análisis no lineal Tiempo-Historia para el diseño del Límite inferior

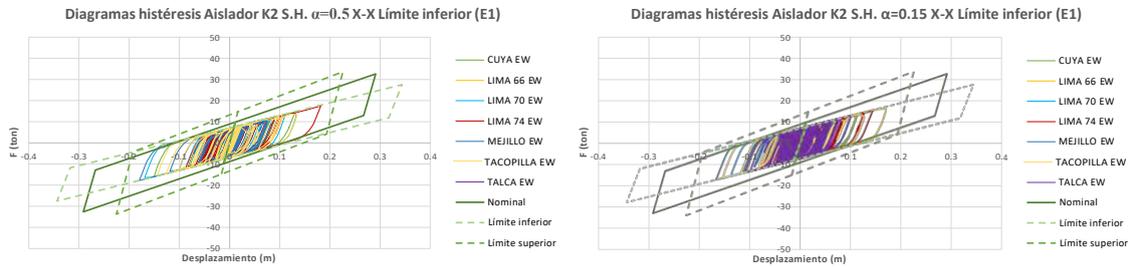


Figura I.1 Diagramas histéresis Sistemas híbridos - Aislador K2 - Límite Inferior - X-X - E1

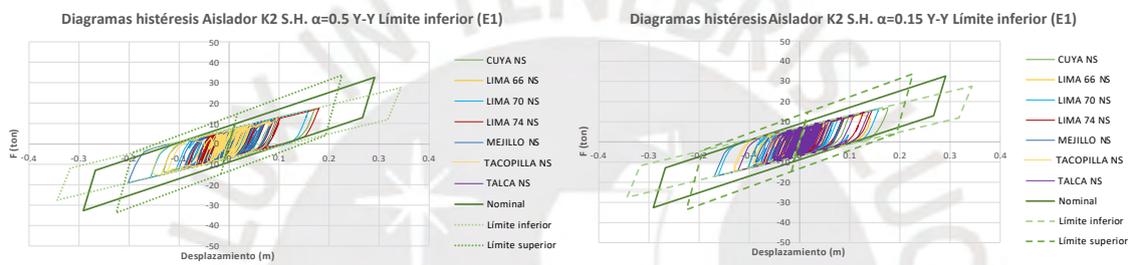


Figura I.2 Diagramas histéresis Sistemas híbridos - Aislador K2 - Límite Inferior - Y-Y - E1

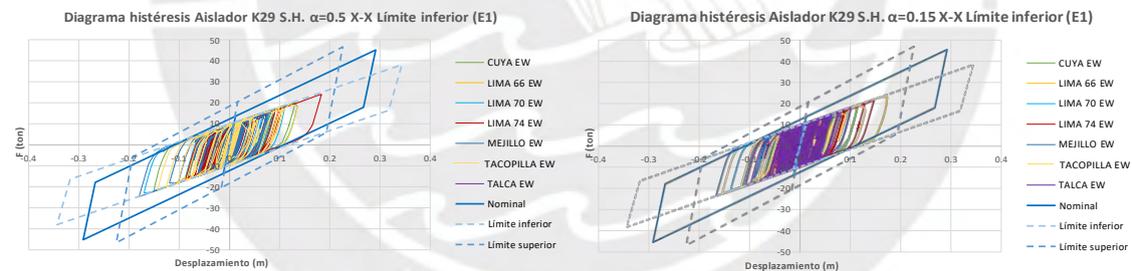


Figura I.3 Diagramas histéresis Sistemas híbridos - Aislador K29 - Límite Inferior - X-X - E1

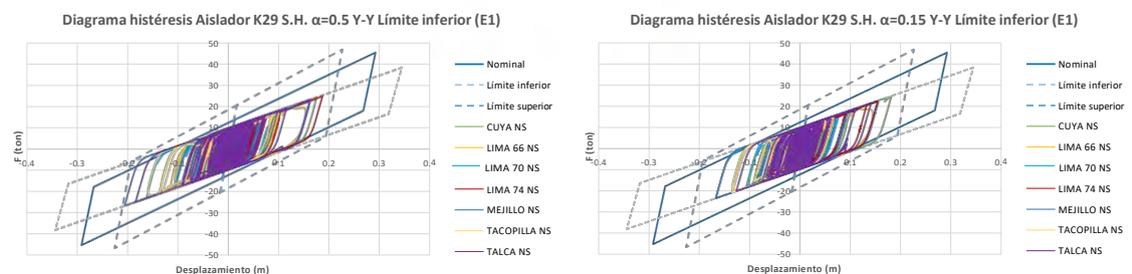


Figura I.4 Diagramas histéresis Sistemas híbridos - Aislador K29 - Límite Inferior - Y-Y - E1

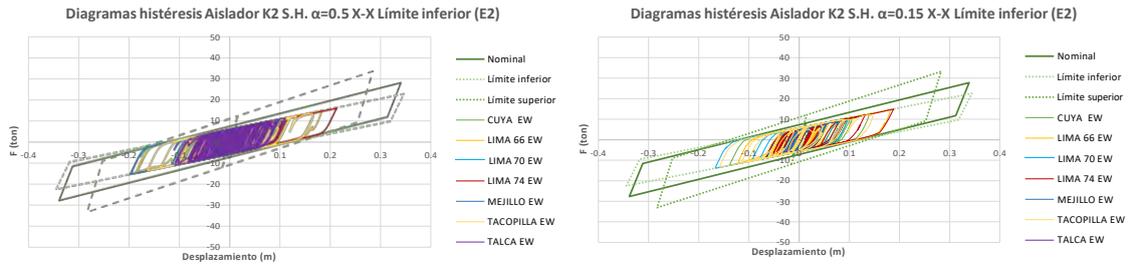


Figura I.5 Diagramas histéresis Sistemas híbridos - Aislador K2 - Límite Inferior - X-X - E2

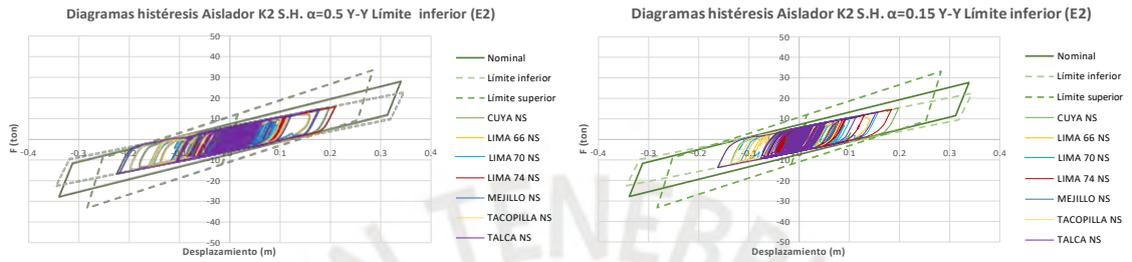


Figura I.6 Diagramas histéresis Sistemas híbridos - Aislador K2 - Límite Inferior - Y-Y - E2

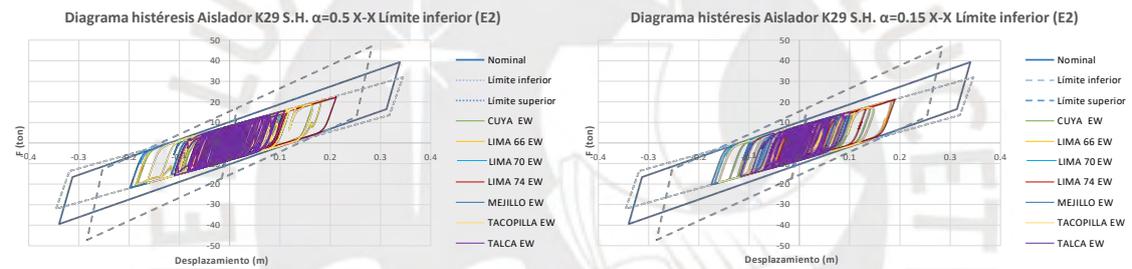


Figura I.7 Diagramas histéresis Sistemas híbridos - Aislador K29 - Límite Inferior - X-X - E2

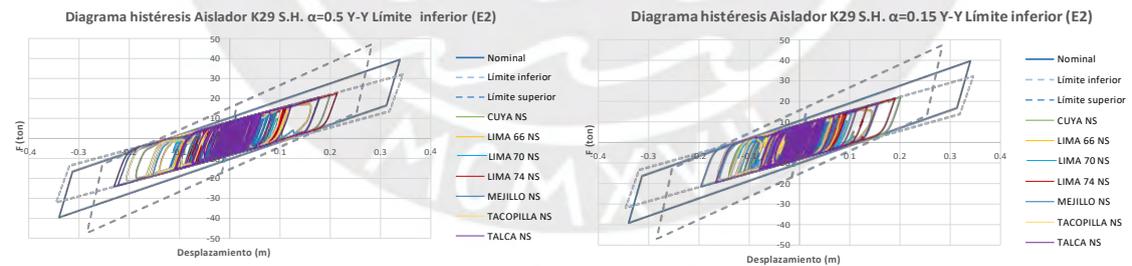


Figura I.8 Diagramas histéresis Sistemas híbridos - Aislador K29 - Límite Inferior - Y-Y - E2

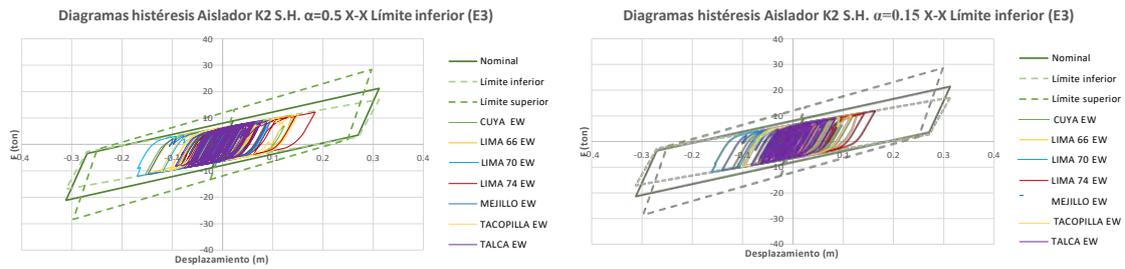


Figura I.9 Diagramas histéresis Sistemas híbridos - Aislador K2 - Límite Inferior - X-X - E3

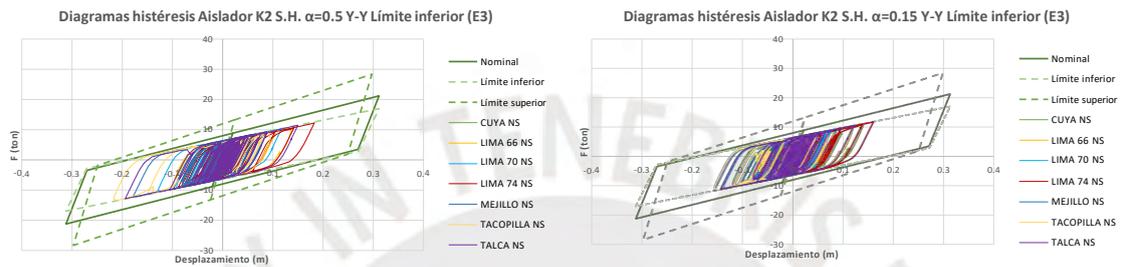


Figura I.10 Diagramas histéresis Sistemas híbridos - Aislador K2 - Límite Inferior - Y-Y - E3

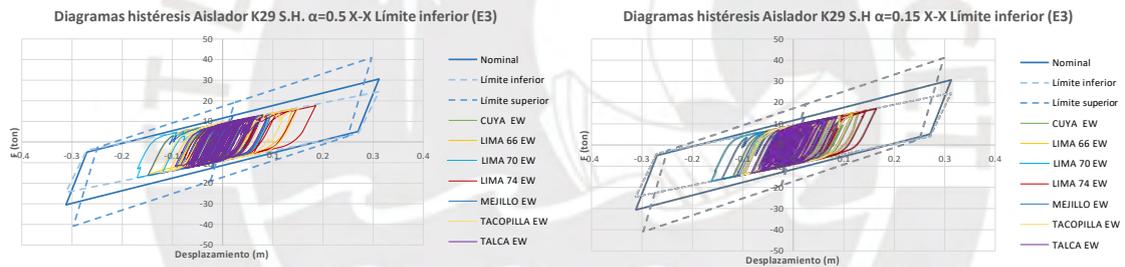


Figura I.11 Diagramas histéresis Sistemas híbridos - Aislador K29 - Límite Inferior - X-X - E3

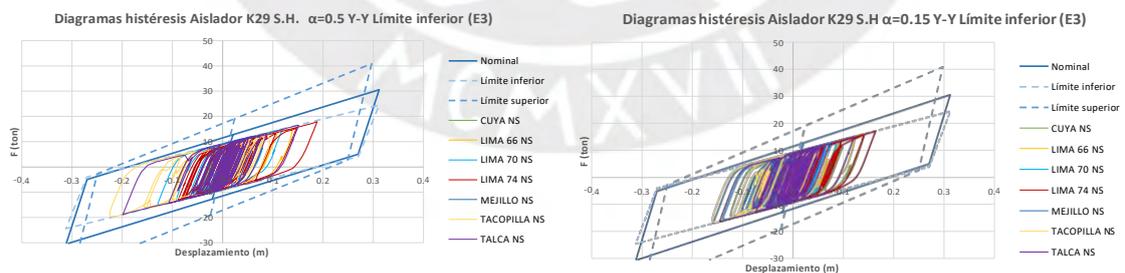


Figura I.12 Diagramas histéresis Sistemas híbridos - Aislador K29 - Límite Inferior - Y-Y - E3

ANEXO J: Variables para la evaluación de eficiencia tomados del Análisis no lineal Tiempo-Historia

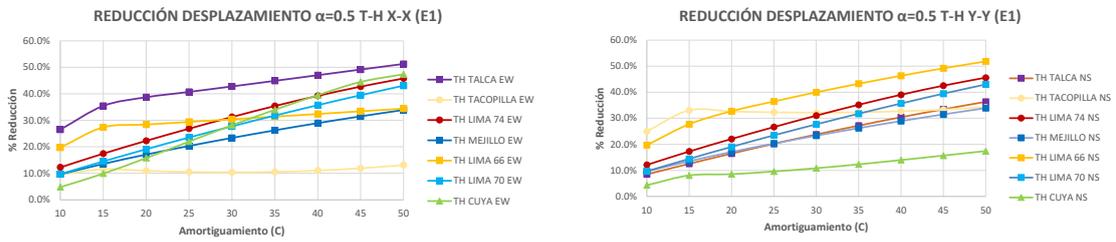


Figura J.1 Reducción de desplazamiento del análisis T-H – 7 sismos – S.H. $\alpha=0.5$ (E1)

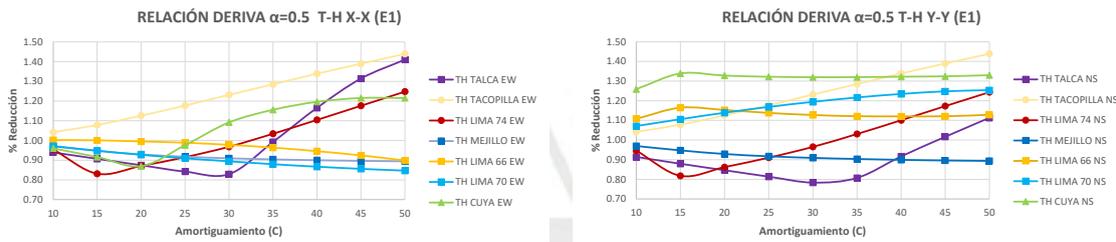


Figura J.2 Relación derivas del análisis T-H – 7 sismos – S.H. $\alpha=0.5$ (E1)

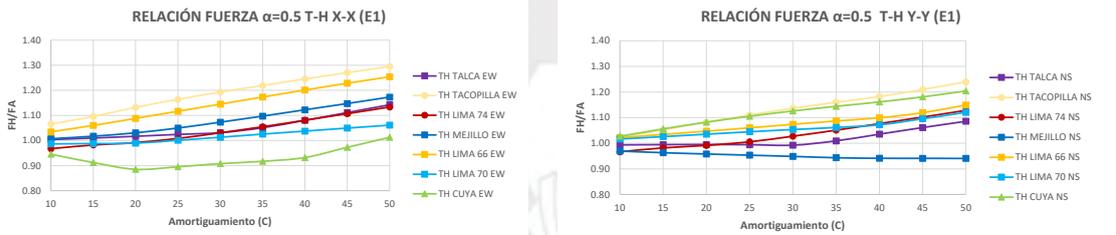


Figura J.3 Relación fuerzas basales del análisis T-H – 7 sismos – S.H. $\alpha=0.5$ (E1)

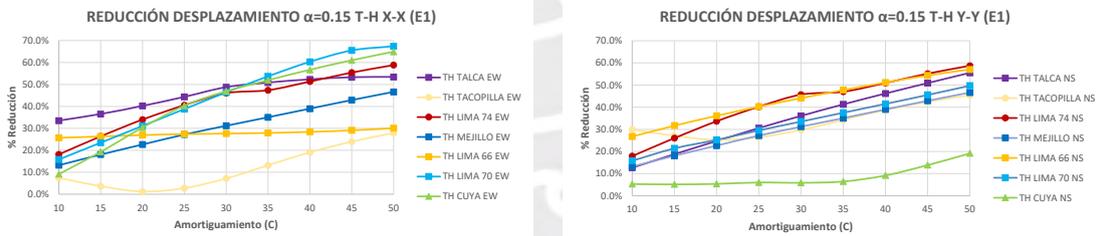


Figura J.4 Reducción de desplazamiento del análisis T-H – 7 sismos – S.H. $\alpha=0.15$ (E1)

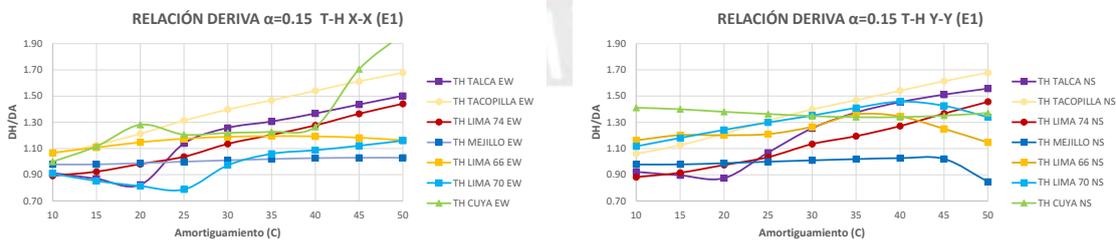


Figura J.5 Relación derivas del análisis T-H – 7 sismos – S.H. $\alpha=0.15$ (E1)

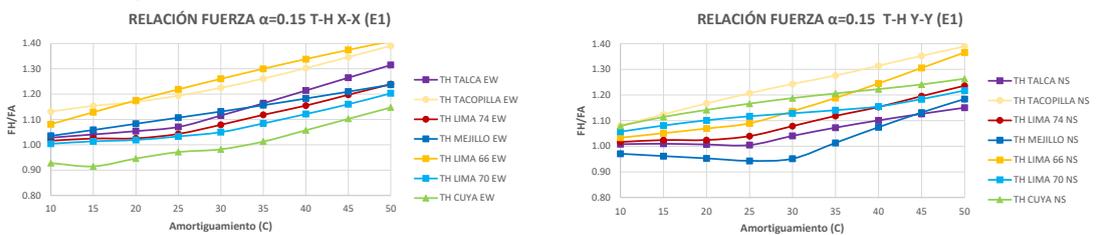


Figura J.6 Relación fuerzas basales del análisis T-H – 7 sismos – S.H. $\alpha=0.5$ (E1)

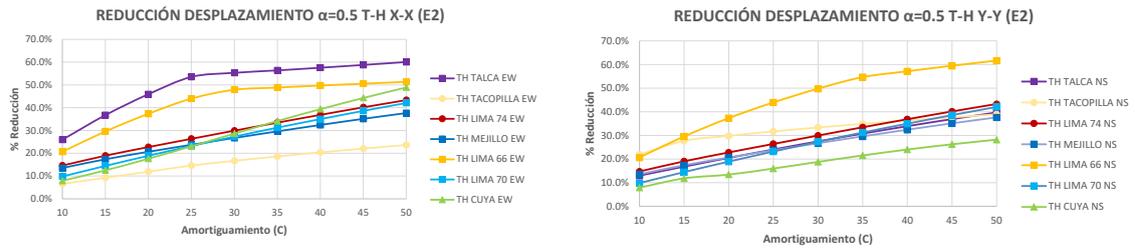


Figura J.7 Reducción de desplazamiento del análisis T-H – 7 sismos – S.H. $\alpha=0.5$ (E2)

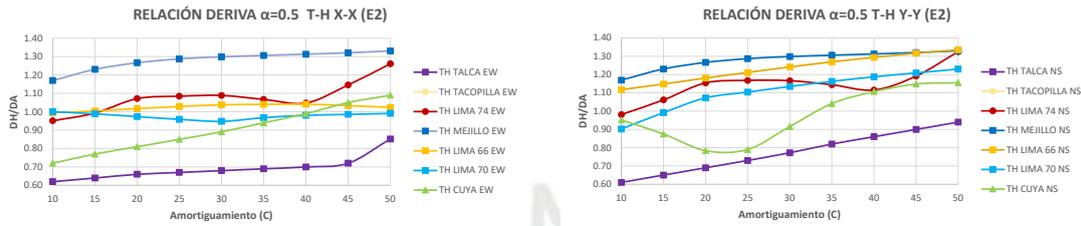


Figura J.8 Relación derivas del análisis T-H – 7 sismos – S.H. $\alpha=0.5$ (E2)

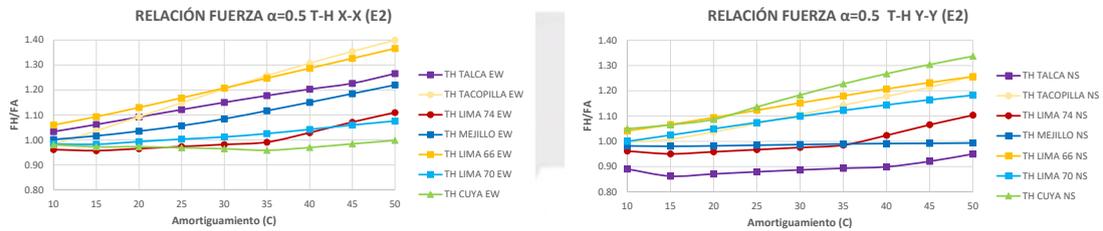


Figura J.9 Relación fuerzas basales del análisis T-H – 7 sismos – S.H. $\alpha=0.5$ (E2)

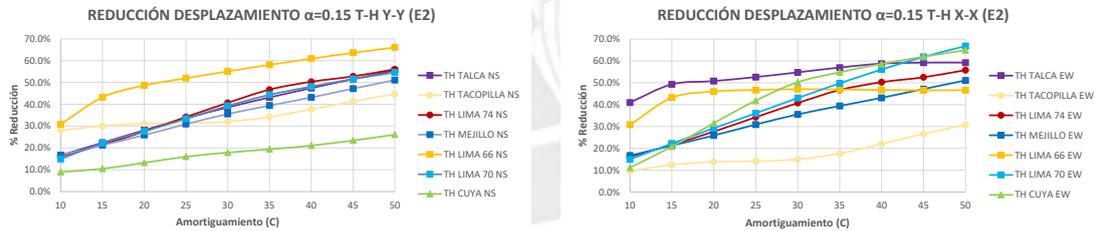


Figura J.10 Reducción de desplazamiento del análisis T-H – 7 sismos – S.H. $\alpha=0.15$ (E2)

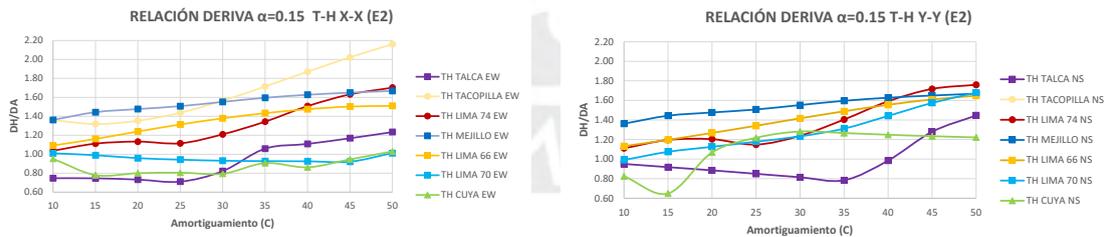


Figura J.11 Relación derivas del análisis T-H – 7 sismos – S.H. $\alpha=0.15$ (E2)

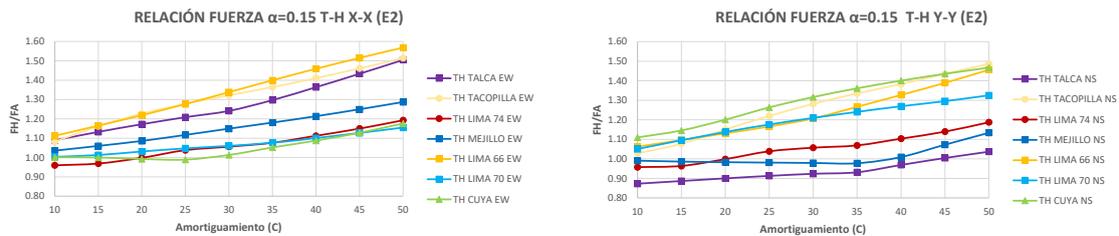


Figura J.12 Relación fuerzas basales del análisis T-H – 7 sismos – S.H. $\alpha=0.5$ (E2)

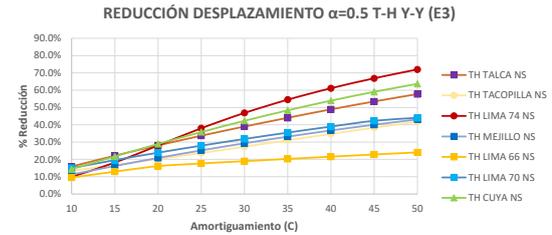
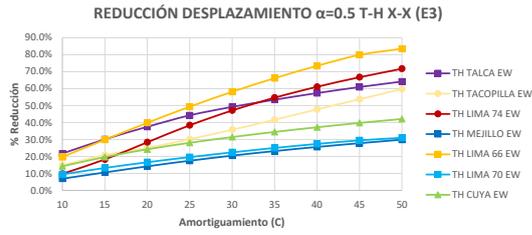


Figura J.13 Reducción de desplazamiento del análisis T-H – 7 sismos – S.H. $\alpha=0.5$ (E3)

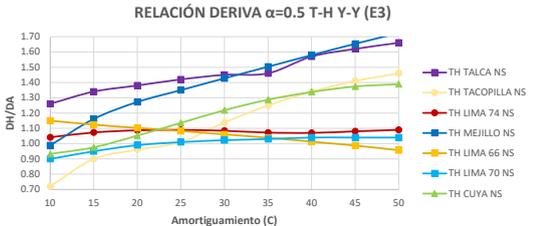
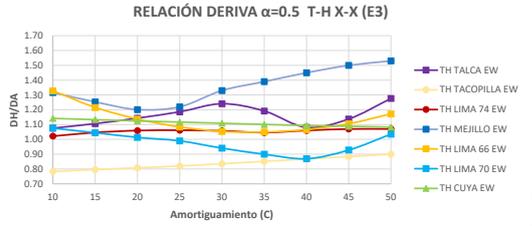


Figura J.14 Relación derivas del análisis T-H – 7 sismos – S.H. $\alpha=0.5$ (E3)

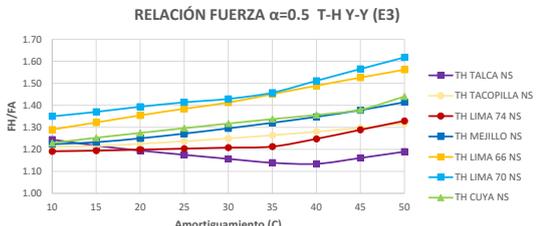
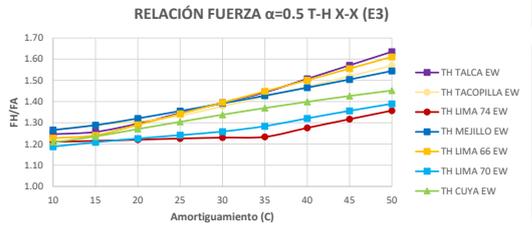


Figura J.15 Relación fuerzas basales del análisis T-H – 7 sismos – S.H. $\alpha=0.5$ (E3)

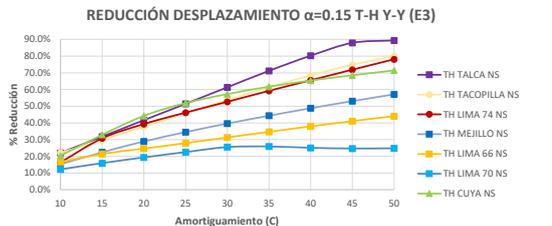
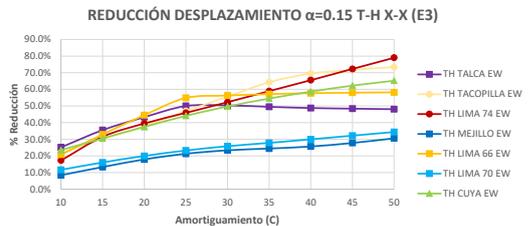


Figura J.16 Reducción desplazamiento del análisis T-H – 7 sismos – S.H. $\alpha=0.15$ (E3)

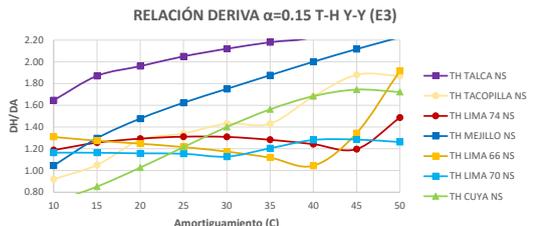
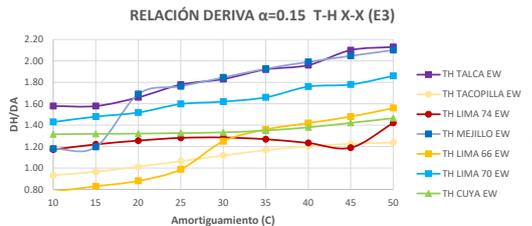


Figura J.17 Relación derivas del análisis T-H – 7 sismos – S.H. $\alpha=0.15$ (E3)

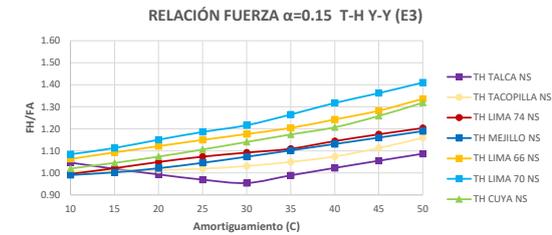
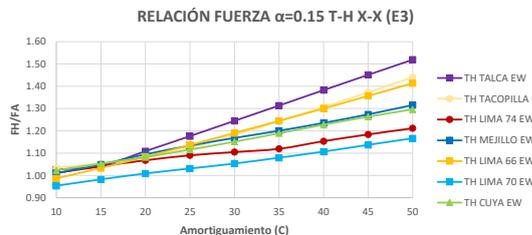


Figura J.18 Relación fuerzas basales del análisis T-H – 7 sismos – S.H. $\alpha=0.15$ (E3)

ANEXO K: Derivas inelásticas del Análisis no lineal Tiempo-Historia para todos los sistemas para el diseño del Límite superior

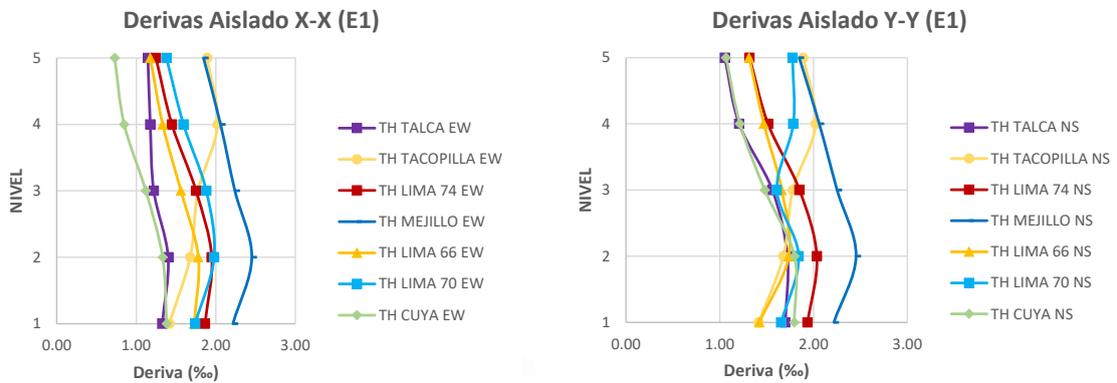


Figura K.1 Derivas inelásticas Sistema Aislado – Límite superior – E1

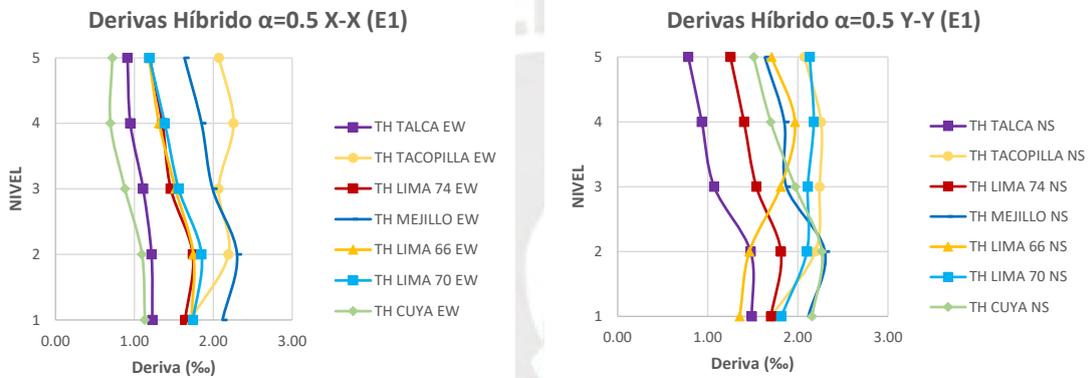


Figura K.2 Derivas inelásticas Sistema Híbrido $\alpha=0.5$ – Límite superior – E1

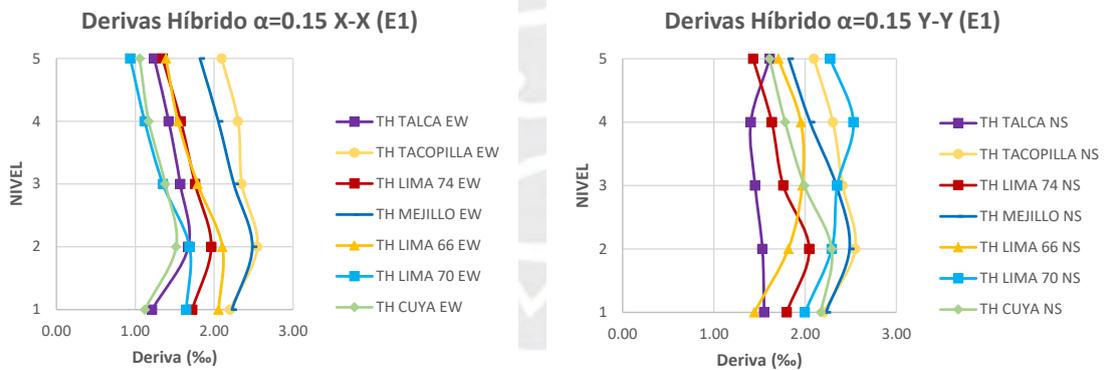


Figura K.3 Derivas inelásticas Sistema Híbrido $\alpha=0.15$ – Límite superior – E1

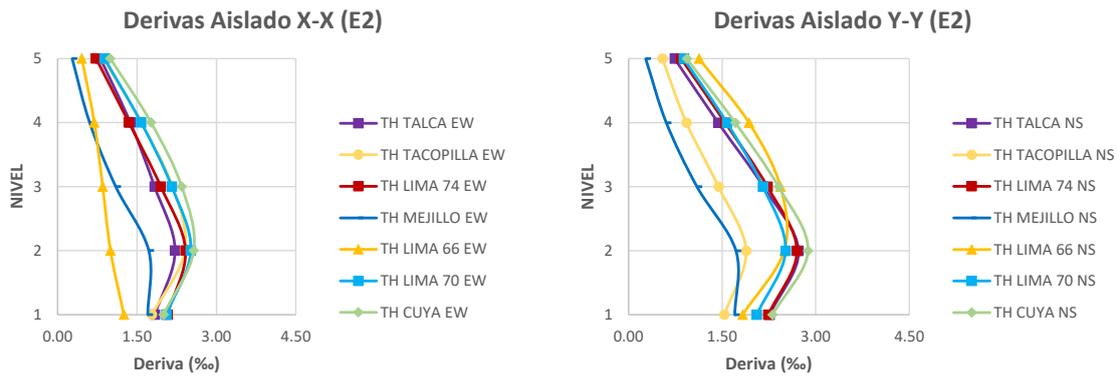


Figura K.4 Derivas inelásticas Sistema Aislado – Límite superior – E2

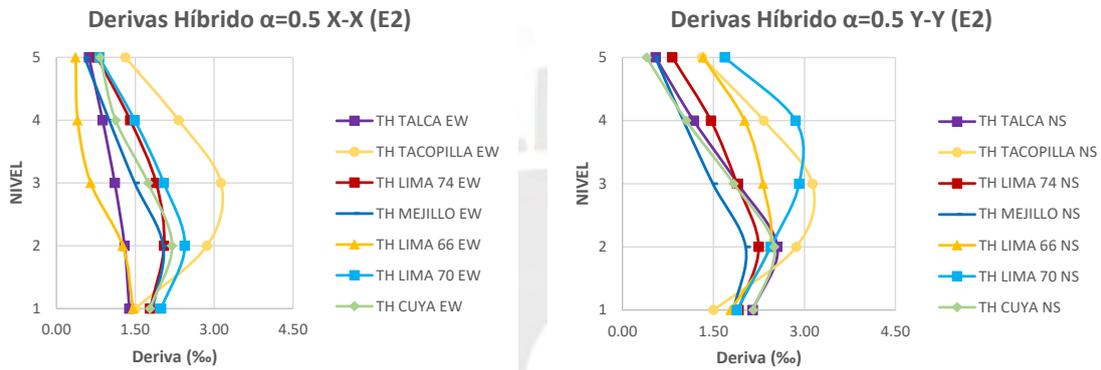


Figura K.5 Derivas inelásticas Sistema Híbrido $\alpha=0.5$ – Límite superior – E2

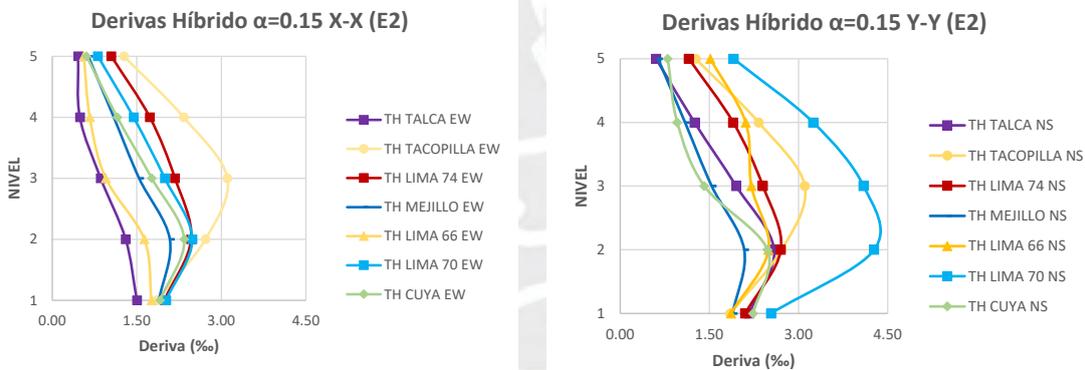


Figura K.6 Derivas inelásticas Sistema Híbrido $\alpha=0.15$ – Límite superior – E2

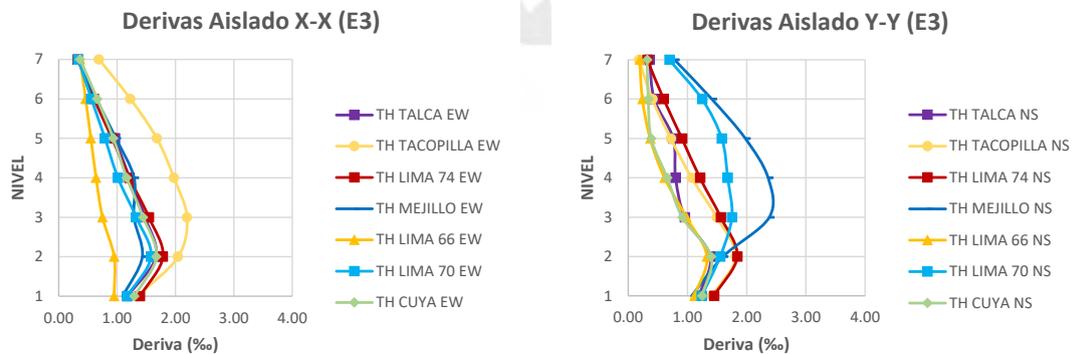


Figura K.7 Derivas inelásticas Sistema Aislado – Límite superior – E3

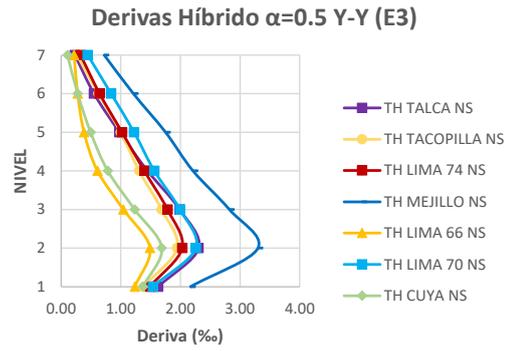
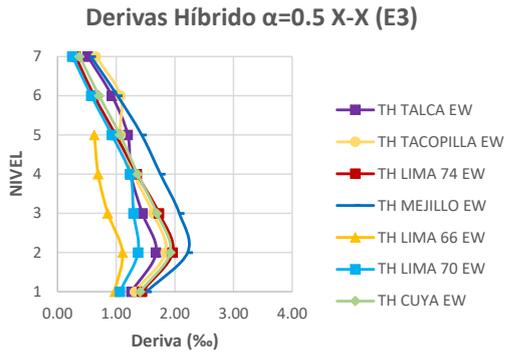


Figura K.8 Derivas inelásticas Sistema Híbrido $\alpha=0.15$ – Límite superior – E3

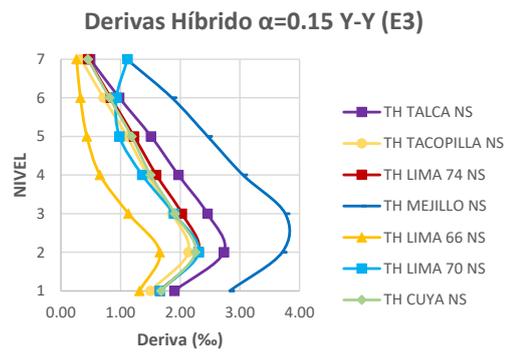
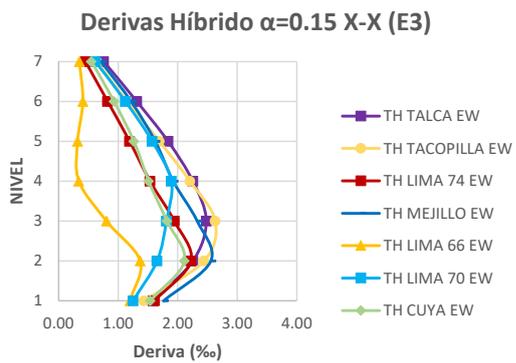
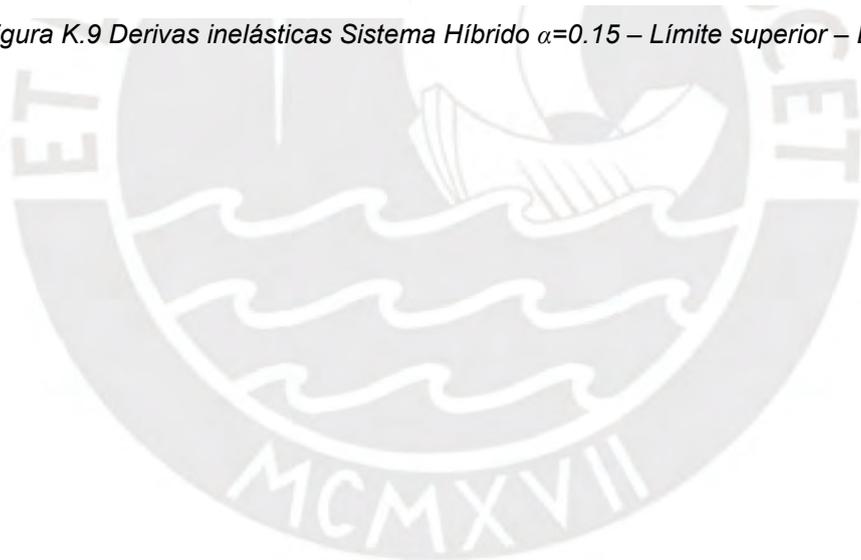


Figura K.9 Derivas inelásticas Sistema Híbrido $\alpha=0.15$ – Límite superior – E3



ANEXO L: Desplazamientos del Análisis no lineal Tiempo-Historia para todos los sistemas para el diseño del Límite inferior

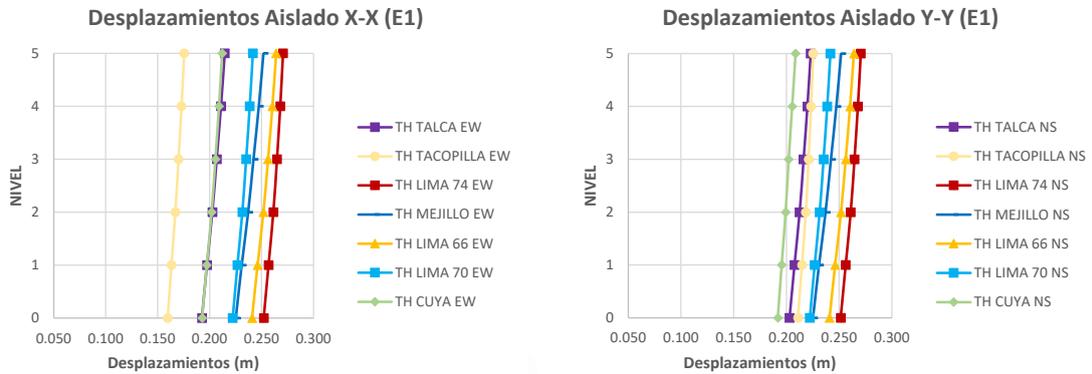


Figura L.1 Desplazamientos Sistema Aislado – Límite inferior – E1

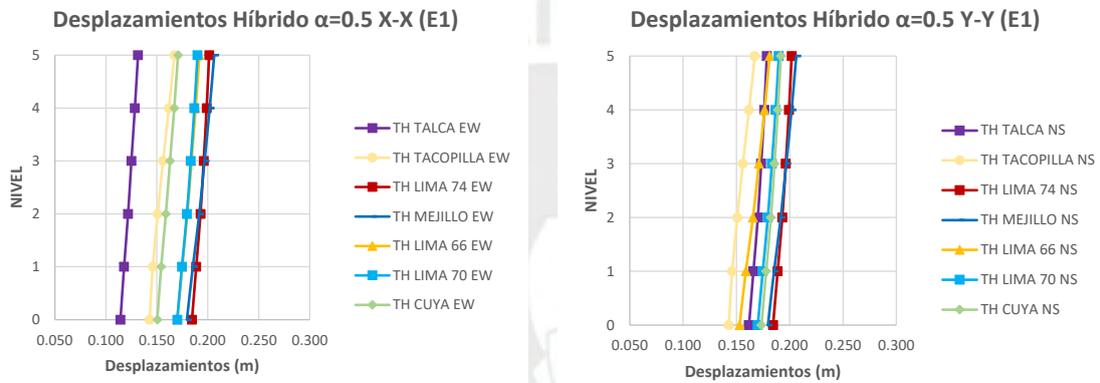


Figura L.2 Desplazamientos Sistema Híbrido $\alpha=0.5$ – Límite inferior – E1

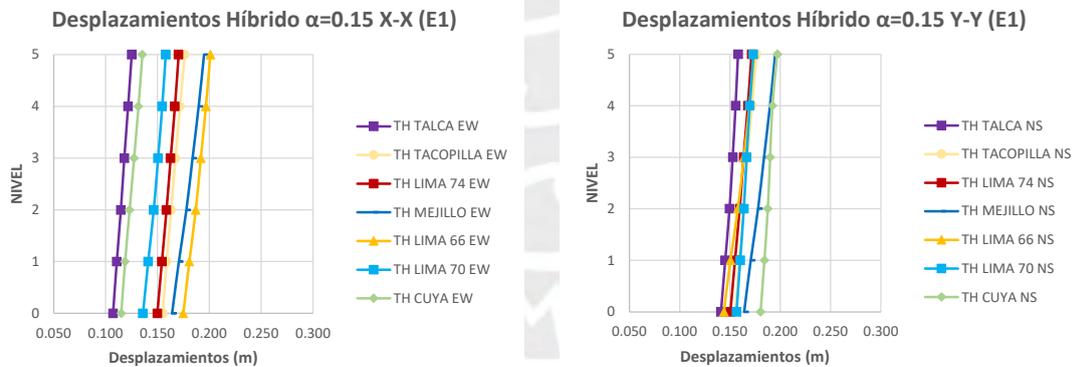


Figura L.3 Desplazamientos Sistema Híbrido $\alpha=0.15$ – Límite inferior – E1

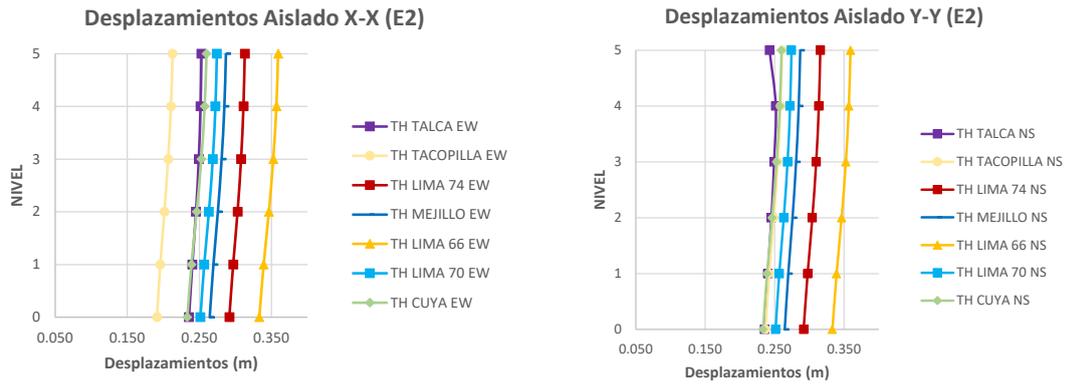


Figura L.4 Desplazamientos Sistema Aislado – Límite inferior – E2

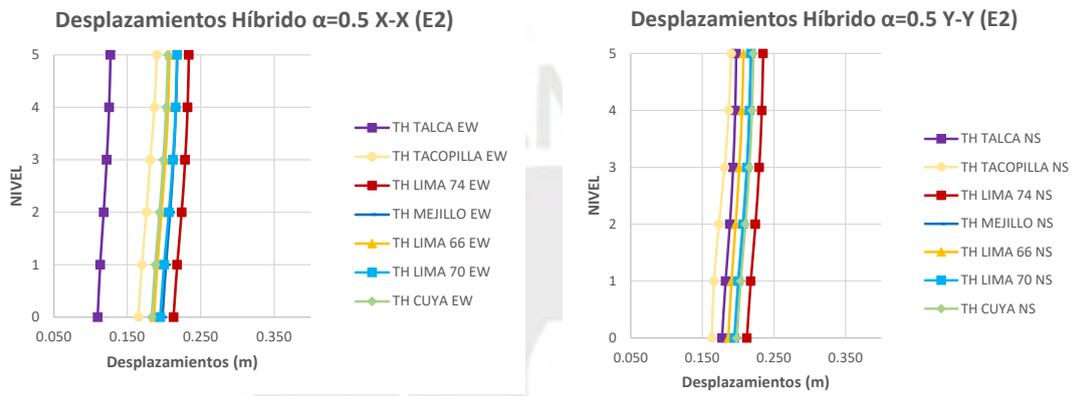


Figura L.5 Desplazamientos Sistema Híbrido $\alpha=0.5$ – Límite inferior – E2

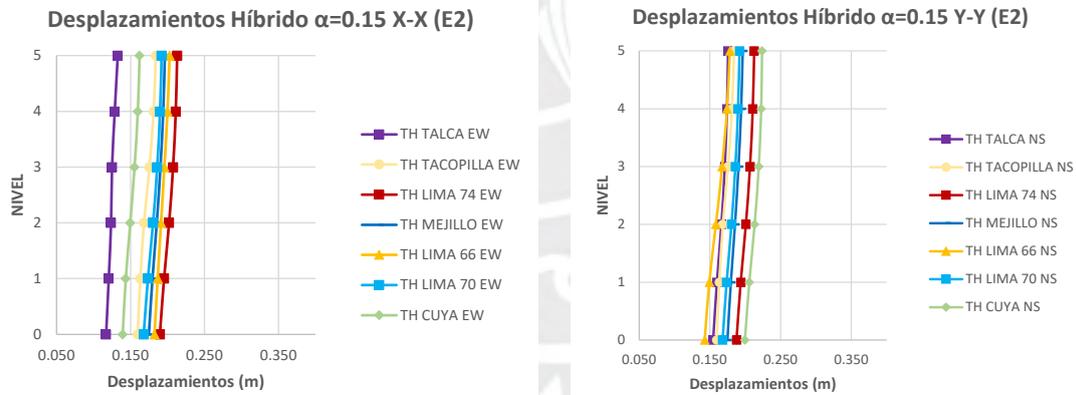


Figura L.6 Desplazamientos Sistema Híbrido $\alpha=0.15$ – Límite inferior – E2

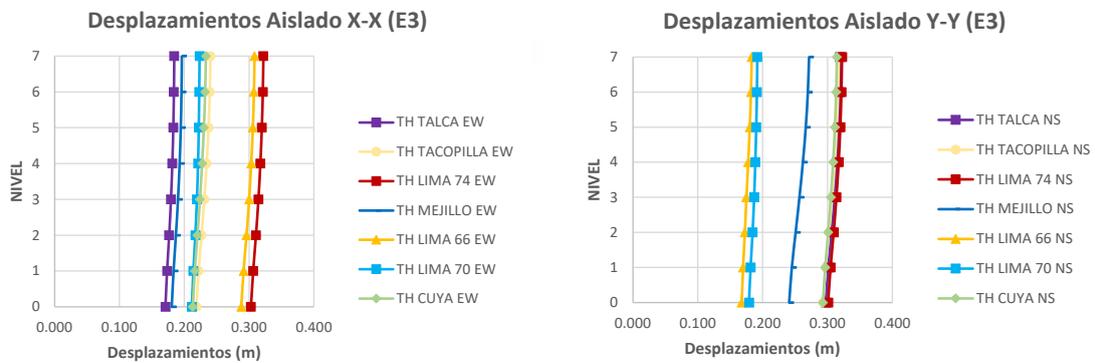


Figura L.7 Desplazamientos Sistema Aislado – Límite inferior – E3

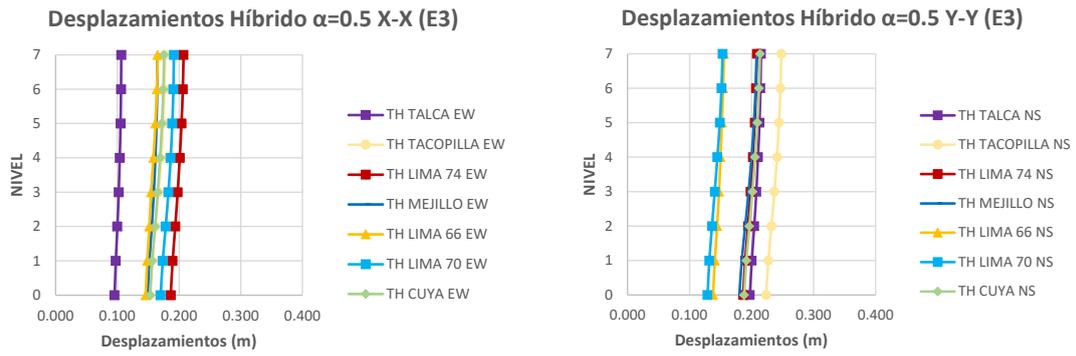


Figura L.8 Desplazamientos Sistema Híbrido $\alpha=0.5$ – Límite inferior – E3

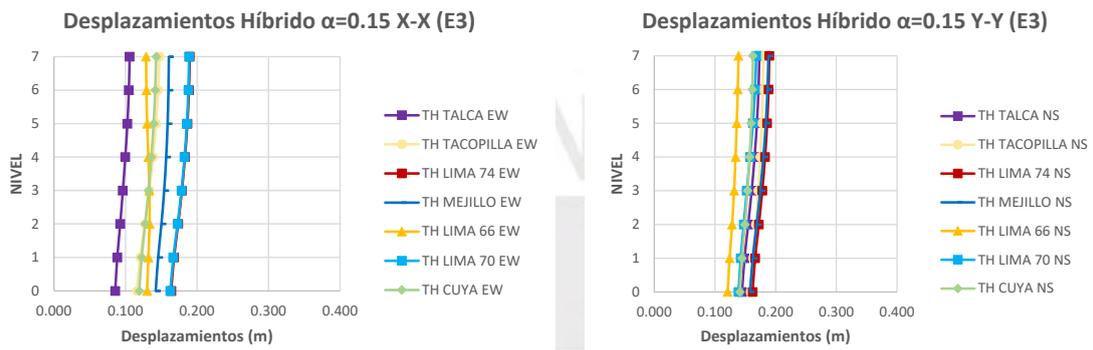


Figura L.9 Desplazamientos Sistema Híbrido $\alpha=0.15$ – Límite inferior – E3

ANEXO M: Aceleraciones del Análisis no lineal Tiempo-Historia para todos los sistemas para el diseño del Límite superior

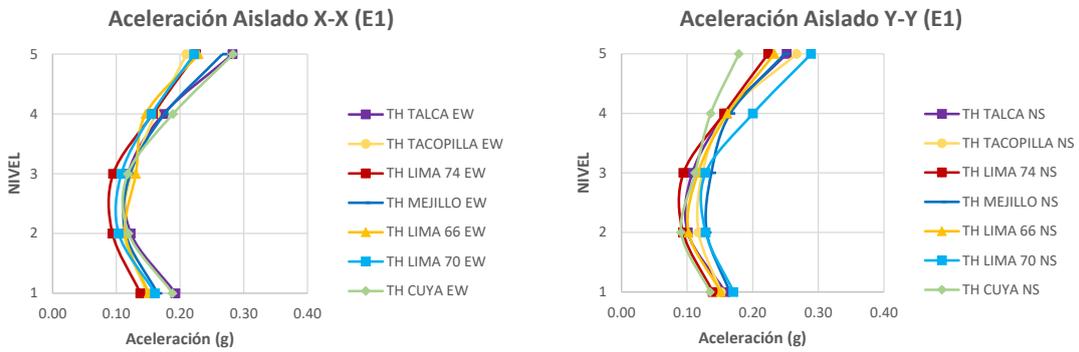


Figura M.1 Aceleraciones Sistema Aislado – Límite superior – E1

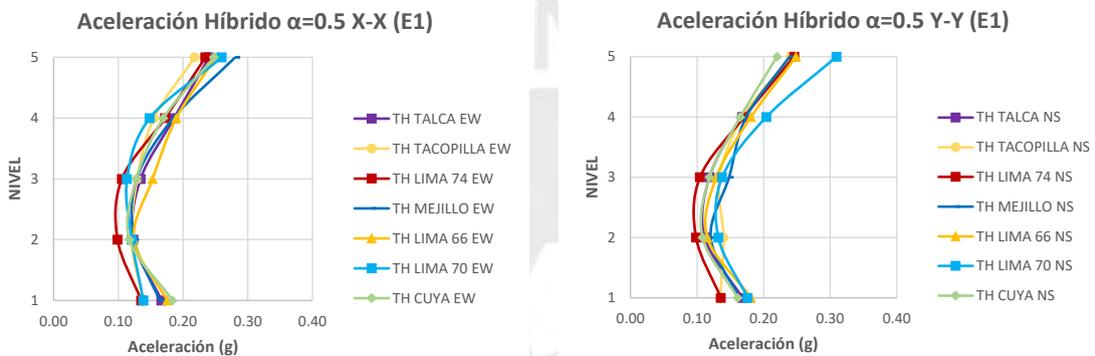


Figura M.2 Aceleraciones Sistema Híbrido $\alpha=0.5$ – Límite superior – E1

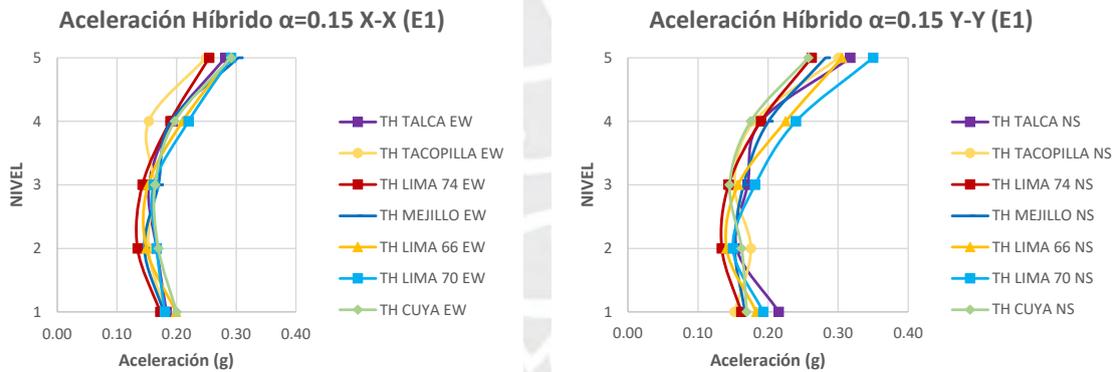


Figura M.3 Aceleraciones Sistema Híbrido $\alpha=0.15$ – Límite superior – E1

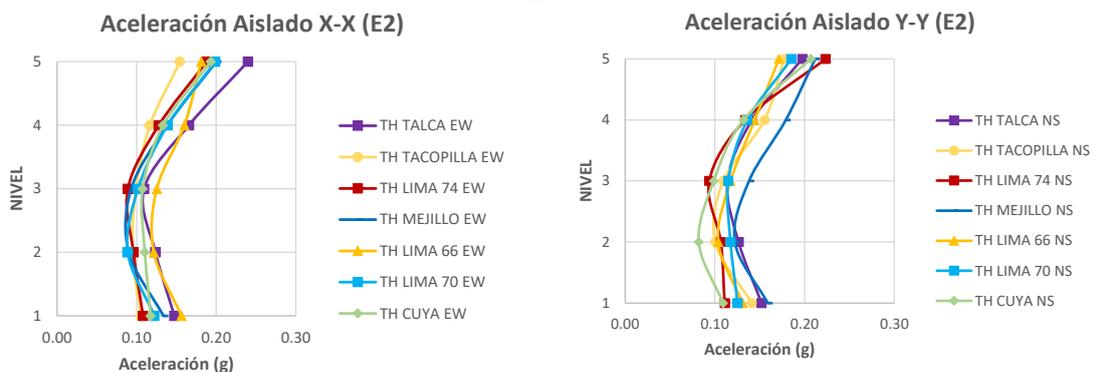


Figura M.4 Aceleraciones Sistema Aislado – Límite superior – E2

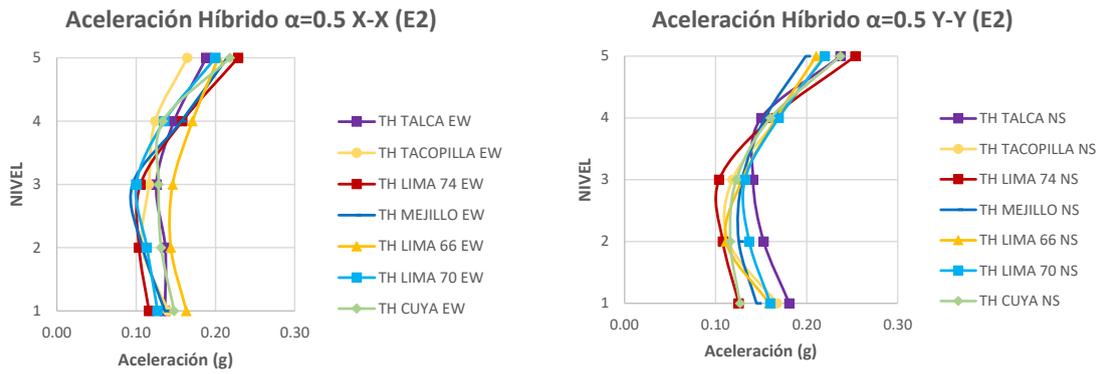


Figura M.5 Aceleraciones Sistema Híbrido $\alpha=0.5$ – Límite superior – E2

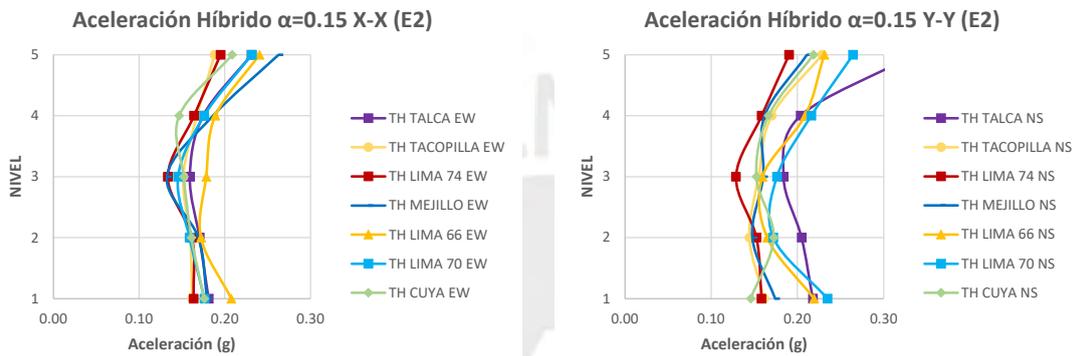


Figura M.6 Aceleraciones Sistema Híbrido $\alpha=0.15$ – Límite superior – E2

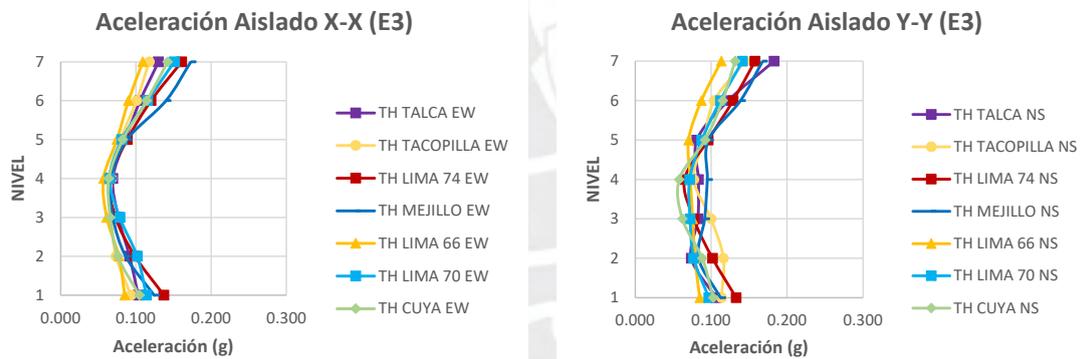


Figura M.7 Aceleraciones Sistema Aislado – Límite superior – E3

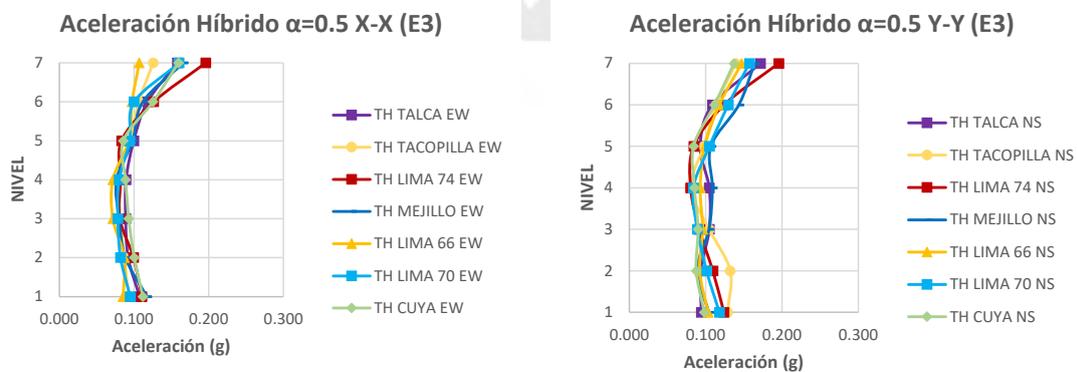


Figura M.8 Aceleraciones Sistema Híbrido $\alpha=0.5$ – Límite superior – E3

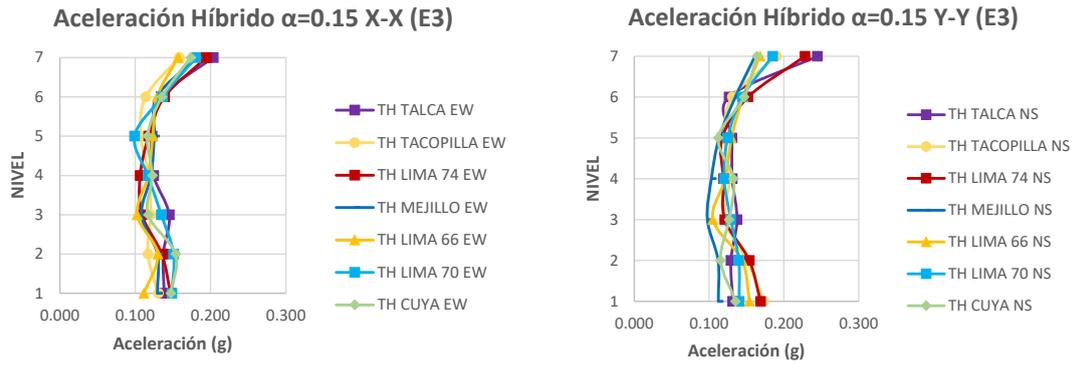


Figura M.9 Aceleraciones Sistema Híbrido $\alpha=0.15$ – Límite superior – E3



ANEXO N: Diagramas histéresis de los amortiguadores en los Sistemas Híbridos - Análisis no lineal Tiempo-Historia para el diseño del Límite inferior.

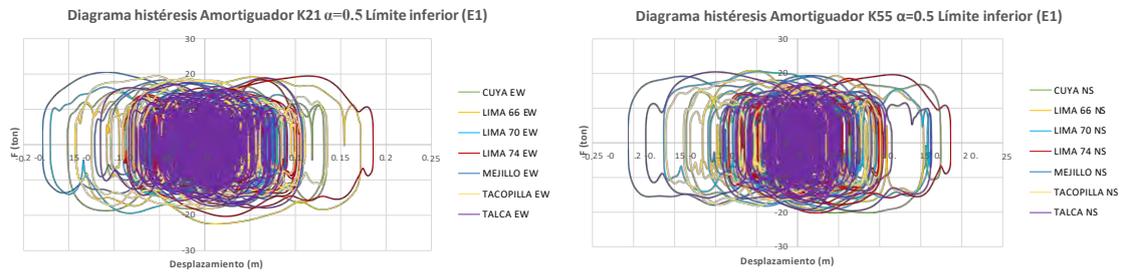


Figura N.1 Diagramas histéresis Amortiguador - $\alpha=0.5$ - Límite Inferior - E1

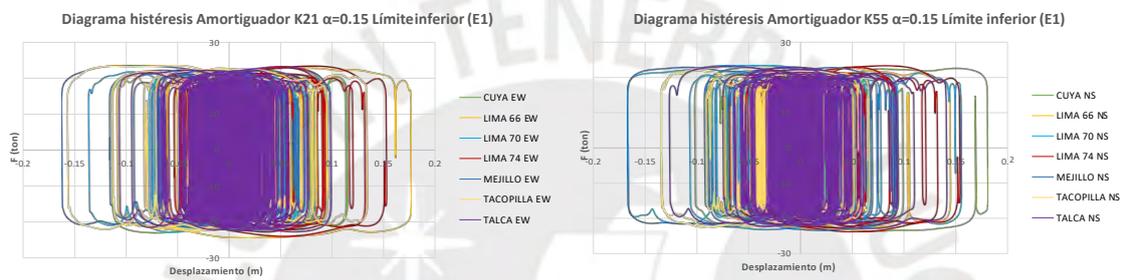


Figura N.2 Diagramas histéresis Amortiguador - $\alpha=0.15$ - Límite Inferior - E1

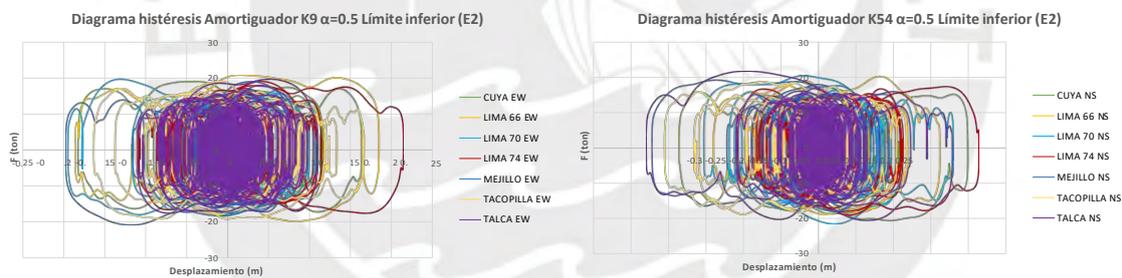


Figura N.3 Diagramas histéresis Amortiguador - $\alpha=0.5$ - Límite Inferior - E2

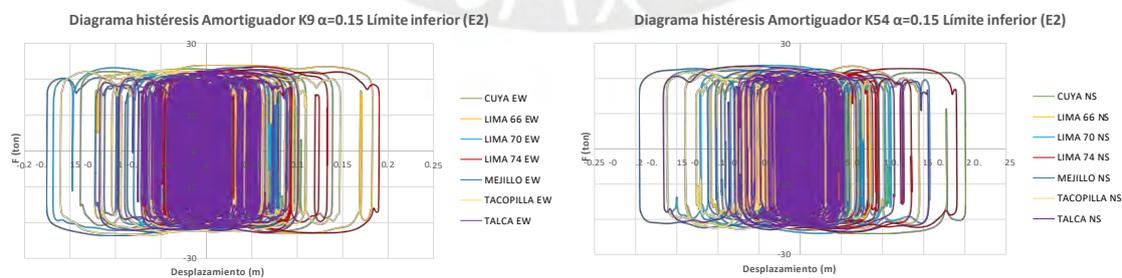


Figura N.4 Diagramas histéresis Amortiguador - $\alpha=0.15$ - Límite Inferior - E2

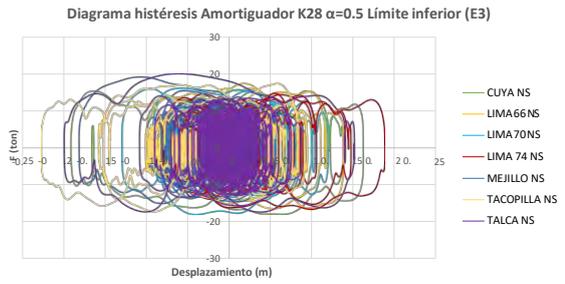
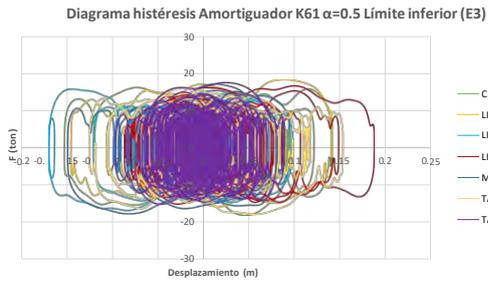


Figura N.5 Diagramas histéresis Amortiguador - $\alpha=0.5$ - Límite Inferior - E3

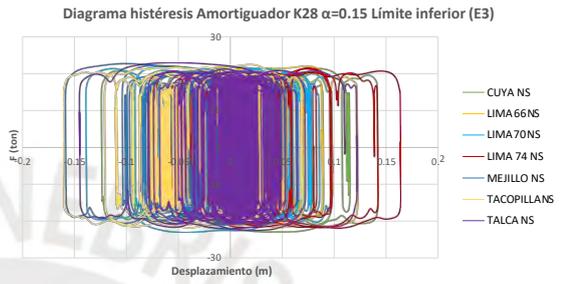
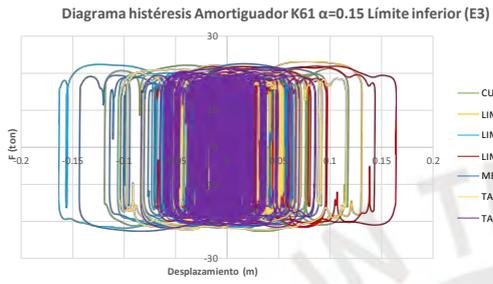
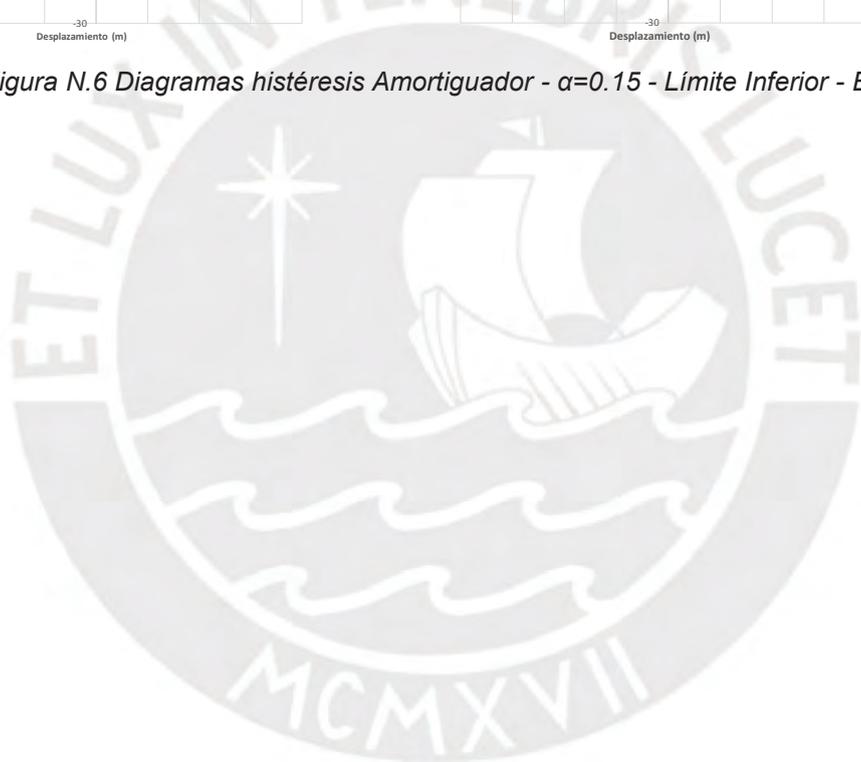


Figura N.6 Diagramas histéresis Amortiguador - $\alpha=0.15$ - Límite Inferior - E3



ANEXO O: Razones de cambio de los gráficos de Fuerza Basal, Derivas y reducción Desplazamiento para diferentes valores de “ α ”

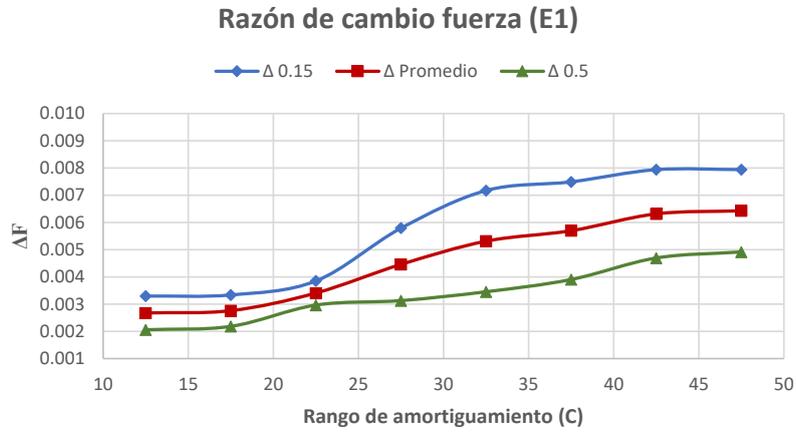


Figura O.1 Razón de cambio de la fuerza basal Estructura E1

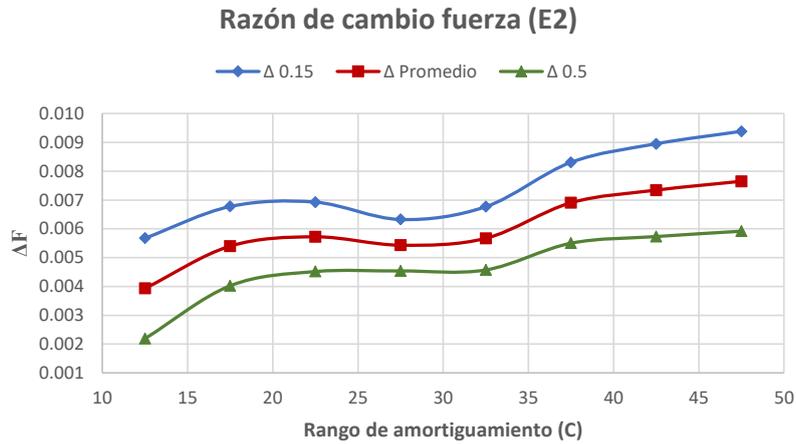


Figura O.2 Razón de cambio de la fuerza basal Estructura E2

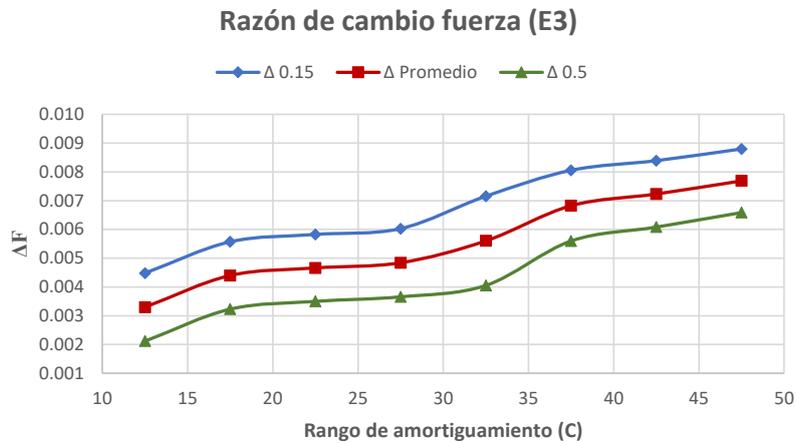


Figura O.3 Razón de cambio de la fuerza basal Estructura E3

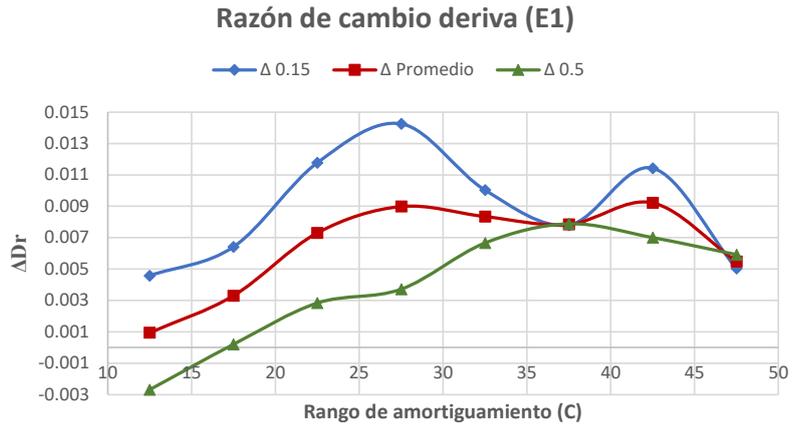


Figura O.4 Razón de cambio de derivas Estructura E1

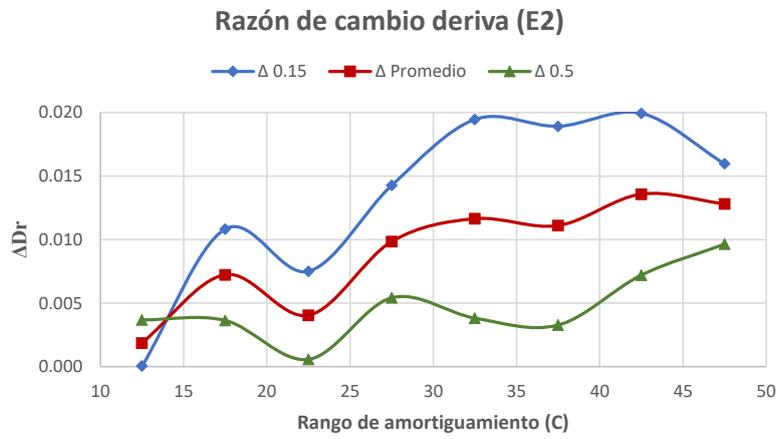


Figura O.5 Razón de cambio de derivas Estructura E2

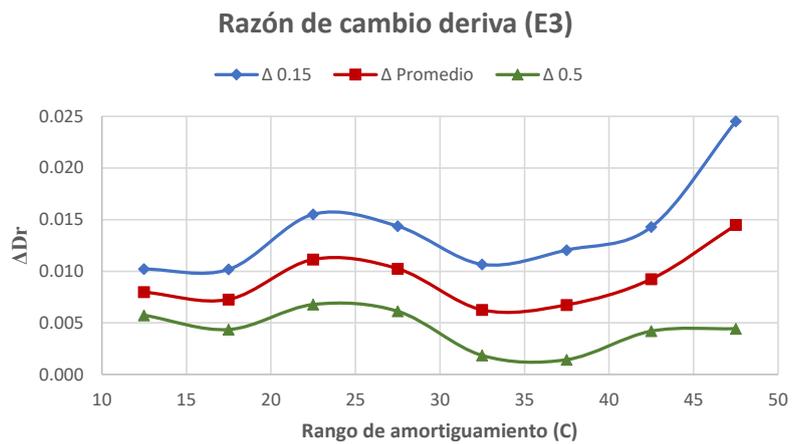


Figura O.6 Razón de cambio de derivas Estructura E3

Razón de cambio desplazamiento (E1)

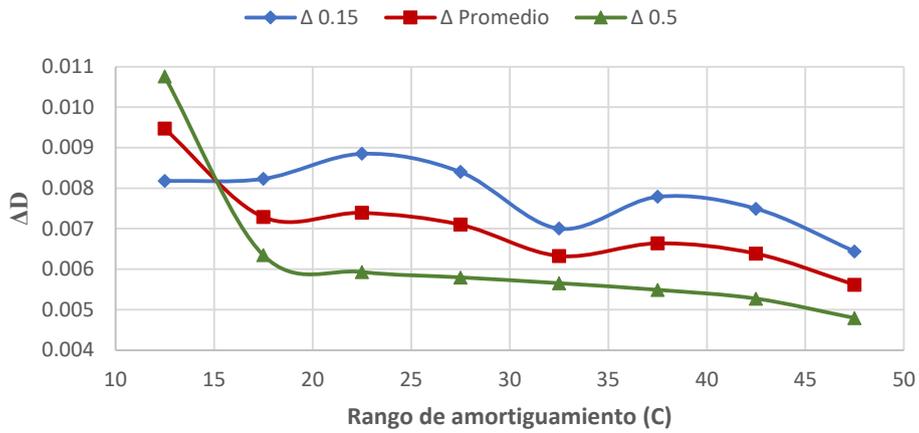


Figura O.7 Razón de reducción de desplazamiento Estructura E1

Razón de cambio desplazamiento (E2)

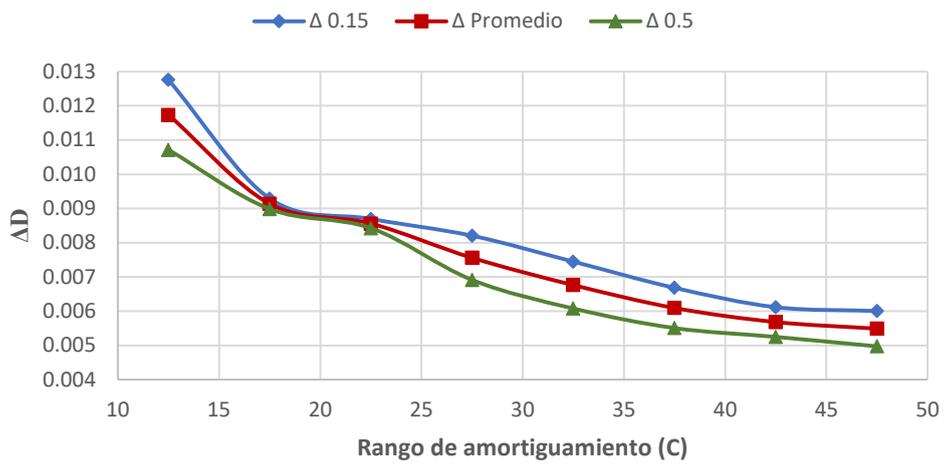


Figura O.8 Razón de reducción de desplazamiento Estructura E2

Razón de cambio desplazamiento (E3)

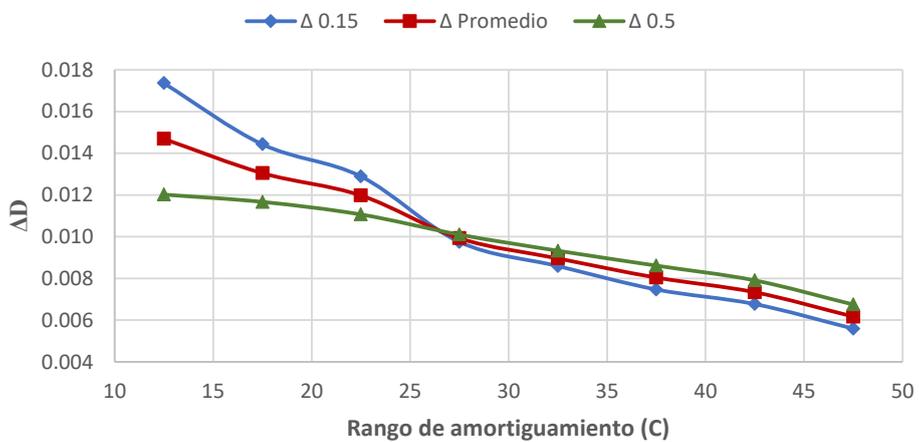


Figura O.9 Razón de reducción de desplazamiento Estructura E3

ANEXO P: Reducción de disipación de energía en el Sistema Híbrido de los aisladores A y B – Límite inferior

Gráfico P.1 Reducción de la energía disipada Aislador A – X-X – Link K2 (E1)

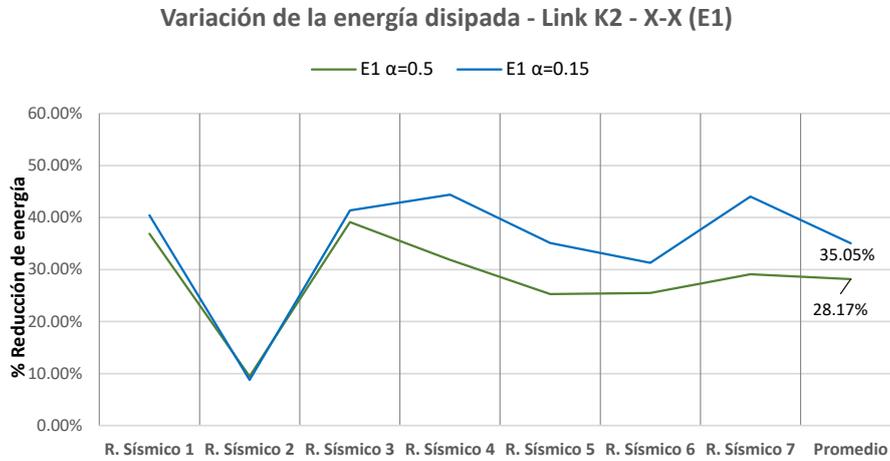


Gráfico P.2 Reducción de la energía disipada Aislador A – Y-Y – Link K2 (E1)

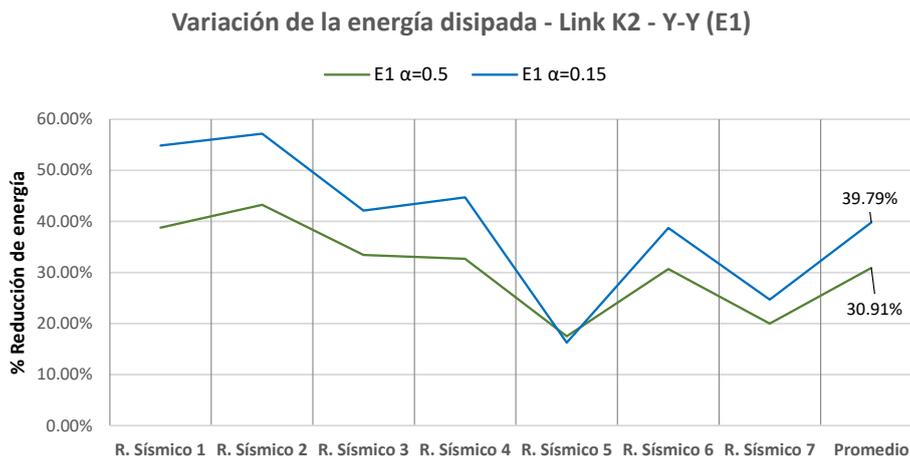


Gráfico P.3 Reducción de la energía disipada Aislador B – X-X – Link K29 (E1)

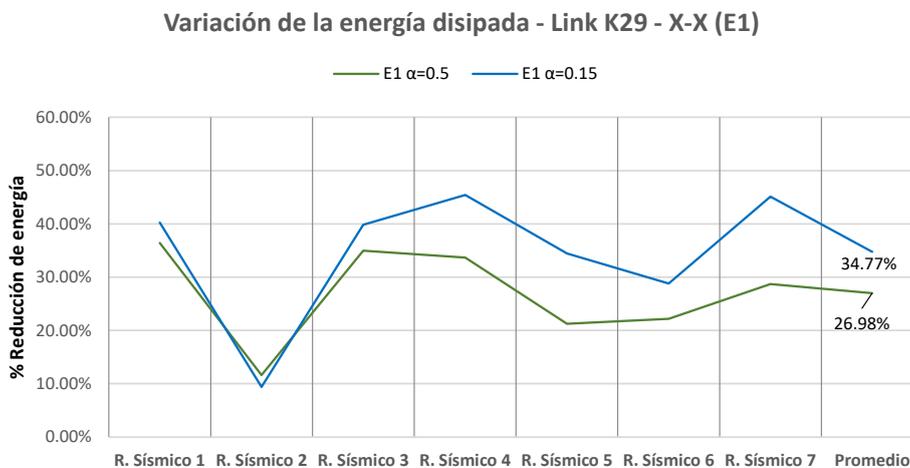


Gráfico P.4 Reducción de la energía disipada Aislador B – Y-Y – Link K29 (E1)

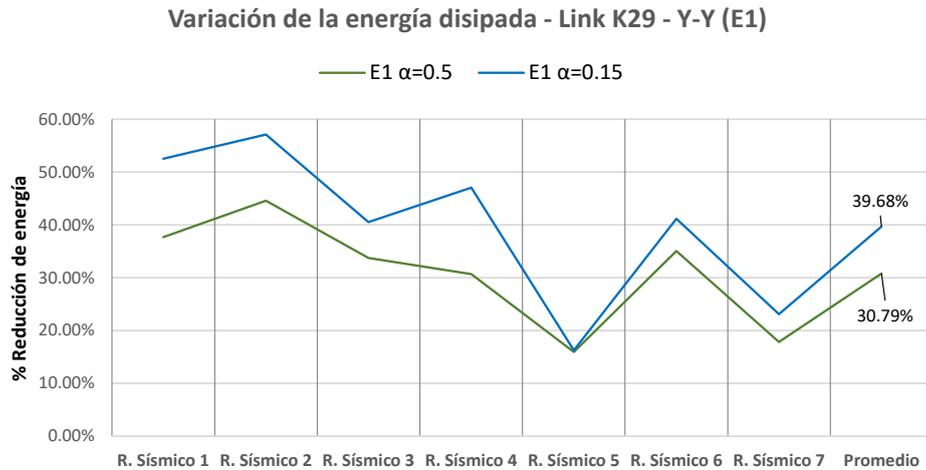


Gráfico P.5 Reducción de la energía disipada Aislador A – X-X – Link K2 (E2)

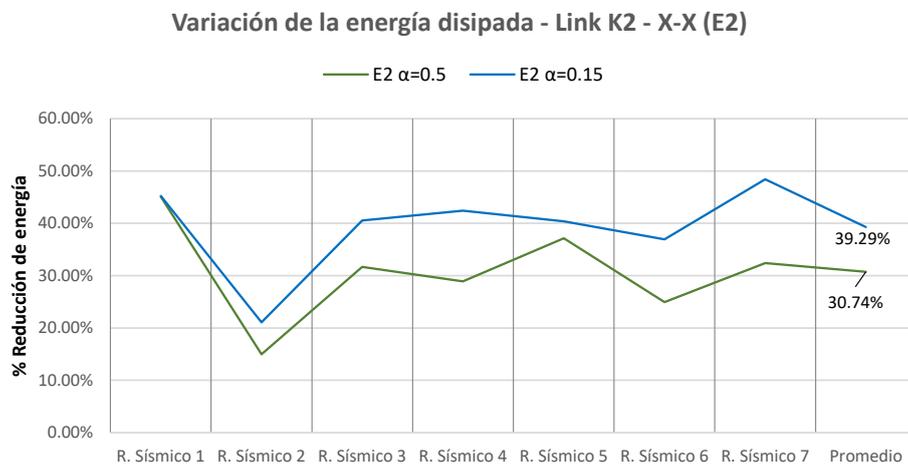


Gráfico P.6 Reducción de la energía disipada Aislador A – Y-Y – Link K2 (E2)

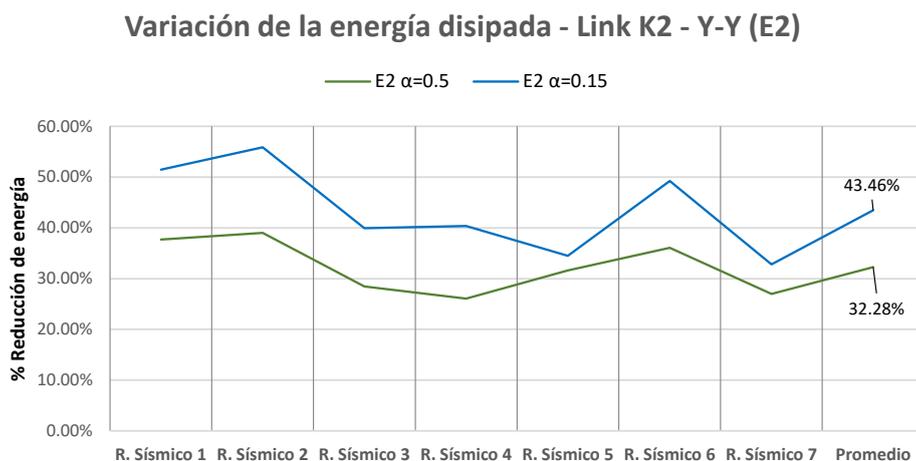


Gráfico P.7 Reducción de la energía disipada Aislador B – X-X – Link K29 (E2)

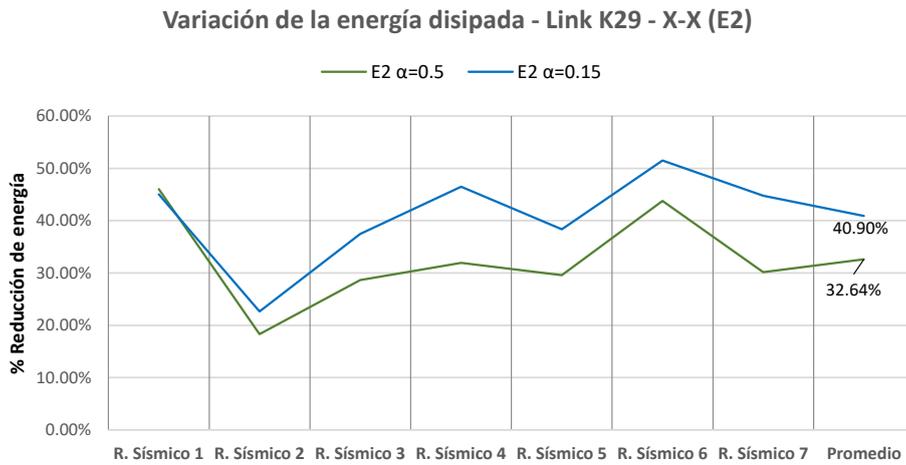


Gráfico P.8 Reducción de la energía disipada Aislador B – Y-Y – Link K29 (E2)

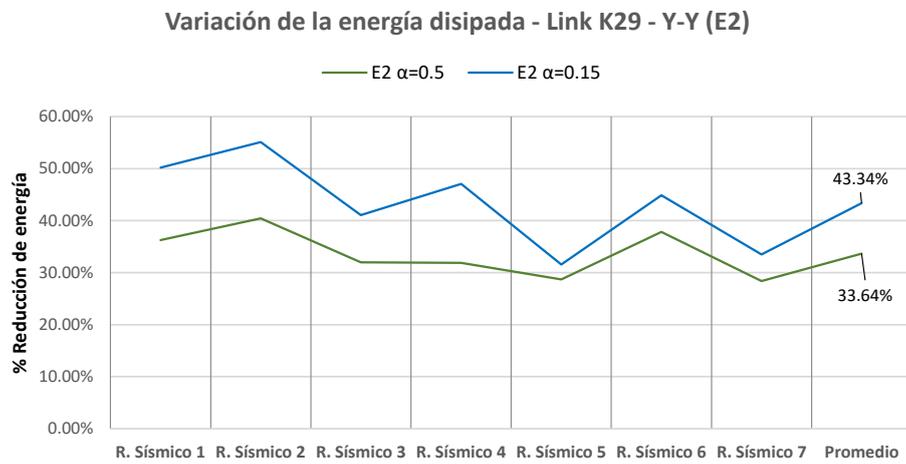


Gráfico P.9 Reducción de la energía disipada Aislador A – X-X– Link K2 (E3)

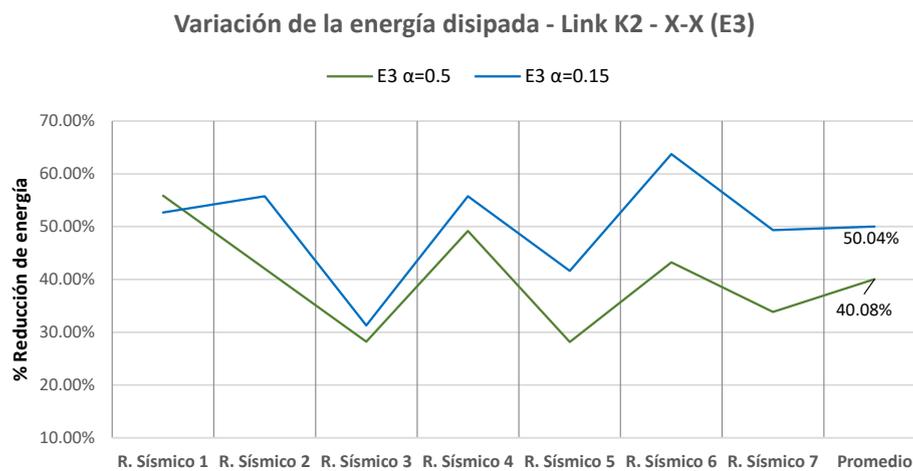


Gráfico P.10 Reducción de la energía disipada Aislador A – Y-Y – Link K2 (E3)

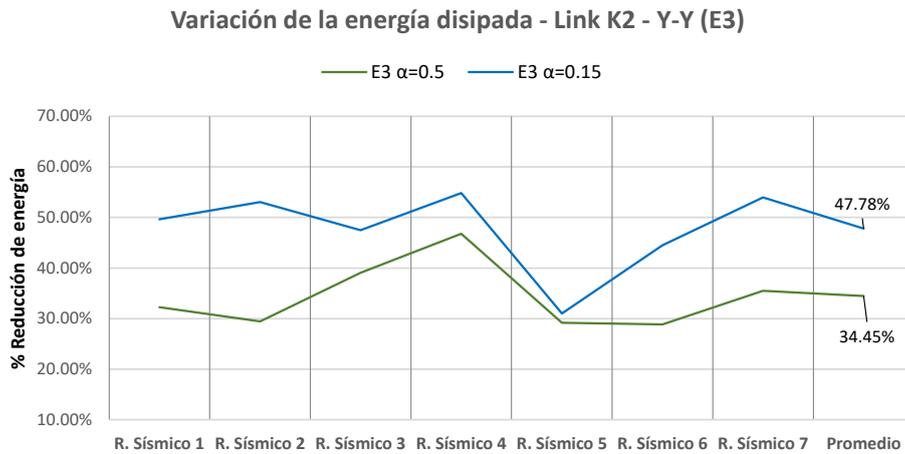


Gráfico P.11 Reducción de la energía disipada Aislador B – X-X – Link K29 (E3)

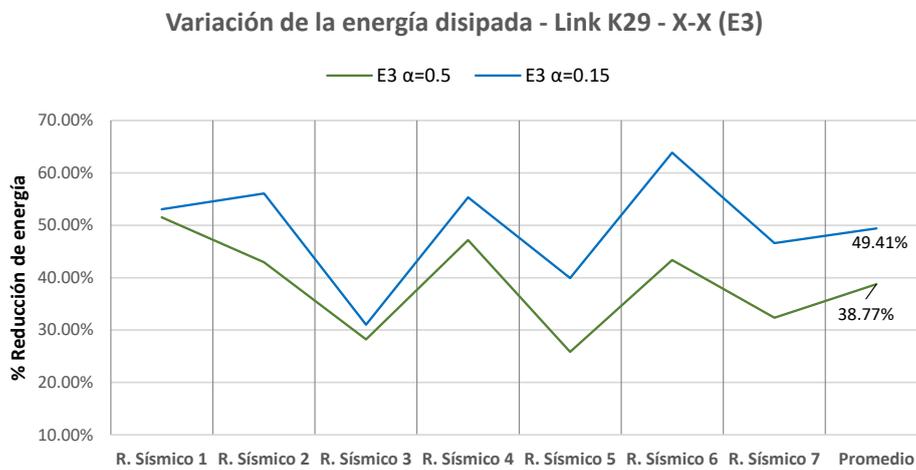


Gráfico P.12 Reducción de la energía disipada Aislador B – Y-Y – Link K29 (E3)

