



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

EVALUACIÓN DE LA RESPUESTA ESTRUCTURAL DE UNA EDIFICACIÓN HOSPITALARIA USANDO TRES SISTEMAS DE AISLAMIENTO SÍSMICO EN LA CIUDAD DE ILO-PERÚ

Línea de investigación:
Construcción sostenible y sostenibilidad ambiental del territorio

Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Civil

Autor

Cabrera Zúñiga, Elías Josue

Asesor

Tello Malpartida, Omart Demetrio

ORCID: 0000-0002-5043-6510

Jurado

Bedia Guillen, Ciro Sergio

García Urrutia-Olavarria, Roque Jesús Leonardo

Madrid Saldaña, Cesar Karlo

Lima - Perú

2025

EVALUACIÓN DE LA RESPUESTA ESTRUCTURAL DE UNA EDIFICACIÓN HOSPITALARIA USANDO TRES SISTEMAS DE AISLAMIENTO SÍSMICO EN LA CIUDAD DE ILO-PERÚ

INFORME DE ORIGINALIDAD

23%

INDICE DE SIMILITUD

22%

FUENTES DE INTERNET

9%

PUBLICACIONES

8%

TRABAJOS DEL
ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1

hdl.handle.net

Fuente de Internet

9%

2

dspace.unitru.edu.pe

Fuente de Internet

1%

3

repositorio.urp.edu.pe

Fuente de Internet

1%

4

repositorio.upt.edu.pe

Fuente de Internet

1%

5

repositorio.ucv.edu.pe

Fuente de Internet

1%

6

Submitted to Universidad Nacional Federico Villarreal

Trabajo del estudiante

1%

7

www.elperulegal.com

Fuente de Internet

1%

8

Submitted to Universidad Ricardo Palma

Trabajo del estudiante

1%

9

repositorio.umsa.bo

Fuente de Internet

1%

10

Submitted to Pontificia Universidad Catolica del Peru

Trabajo del estudiante

<1%

11

vsip.info

Fuente de Internet



Universidad Nacional
Federico Villarreal

VRIN | VICERRECTORADO
DE INVESTIGACIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

EVALUACIÓN DE LA RESPUESTA ESTRUCTURAL DE UNA EDIFICACIÓN
HOSPITALARIA USANDO TRES SISTEMAS DE AISLAMIENTO SÍSMICO EN LA
CIUDAD DE ILO-PERÚ

Línea de Investigación:

Construcción sostenible y sostenibilidad ambiental del territorio

Tesis para optar el título profesional de Ingeniero Civil

Autor:

Cabrera Zúñiga, Elias Josue

Asesor:

Tello Malpartida, Omart Demetrio

ORCID: 0000-0002-5043-6510

Jurado:

Bedia Guillen, Ciro Sergio

García Urrutia-Olavarría, Roque Jesús Leonardo

Madrid Saldaña, Cesar Karlo

Lima – Perú
2025

Dedicatoria:

Esta tesis va dedicada a mis padres, por enseñarme el valor de la familia, el esfuerzo y la superación, por los valores y principios que siempre me inculcaron y por su constante apoyo a lo largo de mi vida y formación profesional.

Agradecimientos:

A Dios, por iluminar mi camino cada día y permitirme vivir una vida maravillosa junto a una familia preciosa.

A mi padre, por ser un gran ejemplo de esfuerzo, dedicación, superación y fortaleza, una persona de la cual nunca termino de aprender.

A mi madre, por estar siempre a mi lado, brindándome todo su amor y apoyo constante e incondicional.

A mi asesor de tesis el ingeniero Omart Demetrio Tello Malpartida, por compartir sus conocimientos y dedicar su tiempo en el desarrollo esta tesis.

ÍNDICE

RESUMEN	11
ABSTRACT.....	12
I. INTRODUCCIÓN.....	13
1.1. Descripción y formulación del problema.....	14
1.1.1. <i>Problema general</i>	16
1.1.2. <i>Problemas específicos</i>	16
1.2. Antecedentes	17
1.3. Objetivos.....	20
1.3.1. <i>Objetivo general</i>	20
1.3.2. <i>Objetivos específicos</i>	21
1.4. Justificación	21
1.5. Hipótesis	22
1.5.1 <i>Hipótesis general</i>	22
1.5.2 <i>Hipótesis específicas</i>	22
II. MARCO TEÓRICO	23
2.1. Bases teóricas sobre el tema de investigación	23
III. MÉTODO	48
3.1. Tipo de investigación.....	48
3.2. Ámbito temporal y espacial	48
3.3. Variables	50
3.3.1 <i>Variable independiente</i>	50
3.3.2 <i>Variable dependiente</i>	50
3.4. Población y muestra.....	50
3.4.1 <i>Población</i>	50
3.4.2 <i>Muestra</i>	50
3.5. Instrumentos.....	51
3.6. Procedimientos.....	52
3.7. Análisis de datos	124
IV. RESULTADOS	125
V. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	151
VI. CONCLUSIONES.....	156
VII. RECOMENDACIONES	159
VIII. REFERENCIAS.....	161
IX. ANEXOS	166

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	<i>Edificaciones hospitalarias con aislamiento sísmico en Perú</i>	15
Tabla 2	<i>Comportamiento de un dispositivo TFP de tres regímenes</i>	31
Tabla 3	<i>Factores de zona “Z”</i>	38
Tabla 4	<i>Factores de suelo “S”</i>	39
Tabla 5	<i>Períodos T_P y T_L</i>	39
Tabla 6	<i>Combinaciones de carga aplicadas a los dispositivos de aislamiento sísmico</i>	40
Tabla 7	<i>Factores de modificación de las propiedades de los dispositivos de Clase I</i>	41
Tabla 8	<i>Factores de modificación de las propiedades de los dispositivos de Clase II</i>	41
Tabla 9	<i>Factor de amortiguamiento B_M</i>	43
Tabla 10	<i>Cargas vivas repartidas</i>	61
Tabla 11	<i>Cargas muertas repartidas</i>	61
Tabla 12	<i>Participación modal de masas en la estructura de base fija</i>	62
Tabla 13	<i>Parámetros preliminares del análisis estático</i>	64
Tabla 14	<i>Parámetros nominales de los aisladores LRB</i>	81
Tabla 15	<i>Parámetros nominales de los aisladores SL</i>	82
Tabla 16	<i>Parámetros en límite superior de los aisladores LRB</i>	83
Tabla 17	<i>Parámetros en límite superior de los aisladores SL</i>	84
Tabla 18	<i>Parámetros en límite inferior de los aisladores LRB</i>	85
Tabla 19	<i>Parámetros en límite inferior de los aisladores SL</i>	86
Tabla 20	<i>Participación modal de masas en el sistema LRB+SL</i>	87
Tabla 21	<i>Parámetros del sistema de aislamiento LRB+SL</i>	88
Tabla 22	<i>Verificación de la fuerza de restitución del sistema LRB+SL</i>	88
Tabla 23	<i>Parámetros nominales de los aisladores LRB</i>	89
Tabla 24	<i>Parámetros nominales de los aisladores HDR</i>	90
Tabla 25	<i>Parámetros nominales de los aisladores SL</i>	91
Tabla 26	<i>Parámetros en límite superior de los aisladores LRB</i>	92
Tabla 27	<i>Parámetros en límite superior de los aisladores HDR</i>	93
Tabla 28	<i>Parámetros en límite superior de los aisladores SL</i>	94
Tabla 29	<i>Parámetros en límite inferior de los aisladores LRB</i>	95
Tabla 30	<i>Parámetros en límite inferior de los aisladores HDR</i>	96
Tabla 31	<i>Parámetros en límite inferior de los aisladores SL</i>	97
Tabla 32	<i>Participación modal de masas en el sistema LRB+HDR+SL</i>	98
Tabla 33	<i>Parámetros del sistema de aislamiento LRB+HDR+SL</i>	99

Tabla 34 Verificación de la fuerza de restitución del sistema LRB+HDR+SL	99
Tabla 35 Parámetros nominales de los aisladores TFP	100
Tabla 36 Parámetros en límite superior de los aisladores TFP	101
Tabla 37 Parámetros en límite inferior de los aisladores TFP	102
Tabla 38 Participación modal de masas en el sistema TFP	103
Tabla 39 Parámetros del sistema de aislamiento TFP	104
Tabla 40 Verificación de la fuerza de restitución del sistema TFP	104
Tabla 41 Centro de masa y rigidez del sistema de aislamiento LRB+SL.....	106
Tabla 42 Centro de masa y rigidez del sistema de aislamiento LRB+HDR+SL	107
Tabla 43 Centro de masa y rigidez del sistema de aislamiento TFP.....	108
Tabla 44 Cargas verticales mínimas que actúan sobre los aisladores.....	112
Tabla 45 Fuerzas y desplazamientos laterales mínimos de los sistemas de aislamiento	113
Tabla 46 Registros sísmicos utilizados	114
Tabla 47 Fuerzas laterales mínimas para los sistemas de aislamiento.....	123
Tabla 48 Máximas derivas de entrepiso para el sistema LRB+SL en el eje X.....	125
Tabla 49 Máximas derivas de entrepiso para el sistema LRB+SL en el eje Y	126
Tabla 50 Máximas derivas de entrepiso para el sistema LRB+HDR+SL en el eje X.....	127
Tabla 51 Máximas derivas de entrepiso para el sistema LRB+HDR+SL en el eje Y	128
Tabla 52 Máximas derivas de entrepiso para el sistema TFP en el eje X.....	129
Tabla 53 Máximas derivas de entrepiso para el sistema TFP en el eje Y	130
Tabla 54 Derivas máximas promedio para los tres sistemas de aislamiento	131
Tabla 55 Máximas aceleraciones de piso para el sistema LRB+SL en el eje X.....	133
Tabla 56 Máximas aceleraciones de piso para el sistema LRB+SL en el eje Y	134
Tabla 57 Máximas aceleraciones de piso para el sistema LRB+HDR+SL en el eje X.....	135
Tabla 58 Máximas aceleraciones de piso para el sistema LRB+HDR+SL en el eje Y	136
Tabla 59 Máximas aceleraciones de piso para el sistema TFP en el eje X.....	137
Tabla 60 Máximas aceleraciones de piso para el sistema TFP en el eje Y	138
Tabla 61 Aceleraciones máximas promedio para los tres sistemas de aislamiento	139
Tabla 62 Desplazamientos máximos de los tres sistemas de aislamiento para cada registro sísmico.....	141
Tabla 63 Fuerzas cortantes máximas en la base de la estructura sobre los sistemas de aislamiento para cada registro sísmico	144
Tabla 64 Fuerzas cortantes máximas en los sistemas de aislamiento para cada registro sísmico.....	147

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 <i>Sistema de aislamiento sísmico</i>	23
Figura 2 <i>Constitución interna de un dispositivo LRB</i>	24
Figura 3 <i>Lazo histerético bilineal de un dispositivo elastomérico</i>	25
Figura 4 <i>Sección transversal de un dispositivo HDR</i>	27
Figura 5 <i>Instalación de dispositivo SL</i>	28
Figura 6 <i>Lazo histerético bilineal de dispositivo SL</i>	28
Figura 7 <i>Sección transversal de un dispositivo TPF</i>	29
Figura 8 <i>Lazos histeréticos fuerza-deformación de un aislador TFP</i>	30
Figura 9 <i>Lazo histerético trilineal de un dispositivo TFP</i>	32
Figura 10 <i>Comparación de la respuesta sísmica de un edificio con base fija y aislada</i>	33
Figura 11 <i>Reducción de aceleraciones por aumento del periodo en espectros elásticos</i>	34
Figura 12 <i>Reducción de aceleraciones por aumento del amortiguamiento en espectros elásticos</i>	34
Figura 13 <i>Reducción de desplazamientos por aumento del amortiguamiento en espectros elásticos</i>	36
Figura 14 <i>Mapa de las zonas sísmicas del Perú</i>	38
Figura 15 <i>Mapa de ubicación de la edificación hospitalaria proyectada</i>	49
Figura 16 <i>Fotografía in situ del terreno propiedad de EsSalud</i>	49
Figura 17 <i>Diagrama de flujo, etapa 1 a 2</i>	52
Figura 18 <i>Diagrama de flujo, etapa 2 a 3</i>	53
Figura 19 <i>Diagrama de flujo, etapa 3 a 4</i>	54
Figura 20 <i>Diagrama de flujo, etapa 4</i>	55
Figura 21 <i>Elevación frontal del hospital materno infantil</i>	56
Figura 22 <i>Planta del primer nivel de la edificación</i>	56
Figura 23 <i>Planta del segundo nivel de la edificación</i>	57
Figura 24 <i>Planta del tercer nivel de la edificación</i>	57
Figura 25 <i>Planta típica de la edificación</i>	58
Figura 26 <i>Modelo numérico de la estructura en base fija</i>	62
Figura 27 <i>Diagrama histerético bilineal de los aisladores LRB (nominal)</i>	82
Figura 28 <i>Diagrama histerético bilineal de los aisladores SL (nominal)</i>	83
Figura 29 <i>Diagrama histerético bilineal de los aisladores LRB (límite superior)</i>	84
Figura 30 <i>Diagrama histerético bilineal de los aisladores SL (límite superior)</i>	85

Figura 31 Diagrama histerético bilineal de los aisladores LRB (límite inferior)	86
Figura 32 Diagrama histerético bilineal de los aisladores SL (límite inferior)	87
Figura 33 Diagrama histerético bilineal de los aisladores LRB (nominal).....	90
Figura 34 Diagrama histerético bilineal de los aisladores HDR (nominal)	91
Figura 35 Diagrama histerético bilineal de los aisladores SL (nominal)	92
Figura 36 Diagrama histerético bilineal de los aisladores LRB (límite superior)	93
Figura 37 Diagrama histerético bilineal de los aisladores HDR (límite superior)	94
Figura 38 Diagrama histerético bilineal de los aisladores SL (límite superior)	95
Figura 39 Diagrama histerético bilineal de los aisladores LRB (límite inferior)	96
Figura 40 Diagrama histerético bilineal de los aisladores HDR (límite inferior)	97
Figura 41 Diagrama histerético bilineal de los aisladores SL (límite inferior)	98
Figura 42 Diagrama histerético trilineal de los aisladores TFP (nominal)	101
Figura 43 Diagrama histerético trilineal de los aisladores TFP (límite superior)	102
Figura 44 Diagrama histerético trilineal de los aisladores TFP (límite inferior).....	103
Figura 45 Distribución en planta de los aisladores en el sistema LRB+SL	106
Figura 46 Distribución en planta de los aisladores en el sistema LRB+HDR+SL	107
Figura 47 Distribución en planta de los aisladores en el sistema TFP.....	108
Figura 48 SMC según las Normas E.030 y E.031	109
Figura 49 Asignación de peso sísmico	110
Figura 50 Caso de carga para el análisis modal espectral en la dirección X.....	110
Figura 51 Caso de carga para el análisis modal espectral en la dirección Y.....	111
Figura 52 Ubicación de los dispositivos de aislamiento.....	112
Figura 53 Registro original de aceleraciones del sismo Iquique 1 en la dirección EW.....	114
Figura 54 Registro original de aceleraciones del sismo Iquique 1 en la dirección NS.....	115
Figura 55 Registro de aceleración, velocidad y desplazamiento del sismo Iquique 1 en la dirección Este-Oeste, corregido y filtrado.....	115
Figura 56 Registro de aceleración, velocidad y desplazamiento del sismo Iquique 1 en la dirección Norte-Sur, corregido y filtrado	116
Figura 57 Espectro del sismo Iquique 1 en la dirección EW escalado al SMC.....	116
Figura 58 Espectro del sismo Iquique 1 en la dirección NS escalado al SMC.....	117
Figura 59 Registro del sismo Iquique 1 en la dirección EW escalado al SMC	117
Figura 60 Registro del sismo Iquique 1 en la dirección NS escalado al SMC	118
Figura 61 Función tiempo-historia tipo rampa	118
Figura 62 Caso de carga de gravedad con la función tiempo-historia tipo rampa.....	119

Figura 63 Registro Iquique 1 en la dirección EW.....	119
Figura 64 Registro Iquique 1 en la dirección NS.....	120
Figura 65 Caso de carga para el sismo Iquique 1 en la dirección EW	120
Figura 66 Caso de carga para el sismo Iquique 1 en la dirección NS	121
Figura 67 Parámetros no lineales del dispositivo LRB 1 del sistema LRB+SL	121
Figura 68 Parámetros no lineales del dispositivo SL del sistema LRB+SL	122
Figura 69 Parámetros no lineales del dispositivo HDR 1 del sistema LRB+HDR+SL	122
Figura 70 Parámetros no lineales del dispositivo TFP 2 del sistema TFP	123
Figura 71 Máximas derivas de entrepiso para el sistema LRB+SL en el eje X.....	126
Figura 72 Máximas derivas de entrepiso para el sistema LRB+SL en el eje Y.....	127
Figura 73 Máximas derivas de entrepiso para el sistema LRB+HDR+SL en el eje X.....	128
Figura 74 Máximas derivas de entrepiso para el sistema LRB+HDR+SL en el eje Y.....	129
Figura 75 Máximas derivas de entrepiso para el sistema TFP en el eje X.....	130
Figura 76 Máximas derivas de entrepiso para el sistema TFP en el eje Y.....	131
Figura 77 Derivas máximas promedio de los tres sistemas de aislamiento en el eje X.....	132
Figura 78 Derivas máximas promedio de los tres sistemas de aislamiento en el eje Y.....	132
Figura 79 Máximas aceleraciones de piso para el sistema LRB+SL en el eje X	134
Figura 80 Máximas aceleraciones de piso para el sistema LRB+SL en el eje Y.....	135
Figura 81 Máximas aceleraciones de piso para el sistema LRB+HDR+SL en el eje X.....	136
Figura 82 Máximas aceleraciones de piso para el sistema LRB+HDR+SL en el eje Y.....	137
Figura 83 Máximas aceleraciones de piso para el sistema TFP en el eje X	138
Figura 84 Máximas aceleraciones de piso para el sistema TFP en el eje Y.....	139
Figura 85 Aceleraciones máximas promedio de los sistemas de aislamiento en el eje X.....	140
Figura 86 Aceleraciones máximas promedio de los sistemas de aislamiento en el eje Y.....	140
Figura 87 Desplazamientos máximos de los tres sistemas de aislamiento para cada registro sísmico en el eje X.....	142
Figura 88 Desplazamientos máximos de los tres sistemas de aislamiento para cada registro sísmico en el eje Y.....	142
Figura 89 Desplazamientos máximos promedio de los tres sistemas de aislamiento sísmico en el eje X.....	143
Figura 90 Desplazamientos máximos promedio de los tres sistemas de aislamiento sísmico en el eje Y.....	143
Figura 91 Fuerzas cortantes máximas en la base de la estructura sobre los sistemas de aislamiento para cada registro sísmico en el eje X.....	145

Figura 92 <i>Fuerzas cortantes máximas en la base de la estructura sobre los sistemas de aislamiento para cada registro sísmico en el eje Y</i>	145
Figura 93 <i>Fuerzas cortantes máximas promedio en la base de la estructura sobre los tres sistemas de aislamiento en el eje X.....</i>	146
Figura 94 <i>Fuerzas cortantes máximas promedio en la base de la estructura sobre los tres sistemas de aislamiento en el eje Y.....</i>	146
Figura 95 <i>Fuerzas cortantes máximas en los sistemas de aislamiento para cada registro sísmico en el eje X.....</i>	148
Figura 96 <i>Fuerzas cortantes máximas en los sistemas de aislamiento para cada registro sísmico en el eje Y.....</i>	148
Figura 97 <i>Fuerzas cortantes máximas en los tres sistemas de aislamiento en el eje X.....</i>	149
Figura 98 <i>Fuerzas cortantes máximas en los tres sistemas de aislamiento en el eje Y.....</i>	149

RESUMEN

Esta investigación tuvo como principal objetivo evaluar en qué medida influye el uso de tres sistemas de aislamiento sísmico en la respuesta estructural de una edificación hospitalaria ubicada en la ciudad de Ilo. Los sistemas utilizados fueron los siguientes: LRB+SL, LRB+HDR+SL y TFP. Esta investigación fue por enfoque cuantitativa y por alcance explicativa, la población estuvo conformada por un hospital materno infantil y la muestra fue constituida por el hospital materno infantil. Esta investigación determinó que las derivas de entrepiso presentaron menores resultados al usar el sistema TFP, obteniendo un máximo de 0.001249; las aceleraciones de piso presentaron menores resultados al usar el sistema TFP, obteniendo un máximo de 0.272g; el desplazamiento máximo del sistema de aislamiento presentó mayores resultados al usar el sistema TFP, obteniendo un máximo de 0.243 m; la fuerza cortante en la base de la superestructura aislada presentó menores resultados al usar el sistema TFP, obteniendo un máximo de 962.66 tonf y la fuerza cortante en el sistema de aislamiento presentó menores resultados al usar el sistema TFP, obteniendo un máximo de 1005.46 tonf. Finalmente, se concluyó que los tres sistemas de aislamiento sísmico evaluados influyen positivamente en la respuesta estructural de la edificación hospitalaria, determinando que los mejores resultados se obtuvieron al usar el sistema TFP.

Palabras clave: aislador elastomérico, aislador de fricción, aislamiento sísmico, respuesta estructural, edificaciones hospitalarias.

ABSTRACT

The main objective of this research was to evaluate to what extent the use of three seismic isolation systems influences the structural response of a hospital building located in the city of Ilo. The systems used were the following: LRB+SL, LRB+HDR+SL and TFP. This research was quantitative in approach and explanatory in scope, the population consisted of a maternal and child hospital and the sample was constituted by the maternal and child hospital. This research determined that the floor drift presented lower results when using the TFP system, obtaining a maximum of 0.001249; floor acceleration presented lower results when using the TFP system, obtaining a maximum of 0.272g; the maximum displacement of the isolation system presented greater results when using the TFP system, obtaining a maximum of 0.243 m; the shear force at the base of the isolated superstructure presented lower results when using the TFP system, obtaining a maximum of 962.66 tonf and the shear force in the isolation system presented lower results when using the TFP system, obtaining a maximum of 1005.46 tonf. Finally, it was concluded that the three seismic isolation systems evaluated positively influence the structural response of the hospital building, determining that the best results were obtained when using the TFP system.

Keywords: elastomeric isolator, friction isolator, seismic isolation, structural response, hospital buildings.

I. INTRODUCCIÓN

Los terremotos son fenómenos naturales que ponen constantemente a prueba las estructuras creadas por la humanidad. El Perú a lo largo de su historia ha experimentado una gran cantidad de estos eventos debido a su ubicación dentro del cinturón de fuego del Pacífico.

La filosofía de diseño de estructuras convencionales tiene como objetivo evitar el colapso debido a la ocurrencia de eventos sísmicos, manteniendo en lo posible bajos costos de construcción, permitiendo deformaciones plásticas dúctiles, lo que implica que las edificaciones puedan sufrir daños significativos, perdiendo en muchos casos su funcionalidad (Takagi y Wada, 2019). Esta filosofía es compartida por la Norma E.030 de Diseño Sismorresistente (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento [MVCS], 2020), la cual indica en el artículo 3 que las estructuras podrían sufrir daños importantes ante sismos severos, siempre y cuando estas no colapsen, alegando que no es técnica ni financieramente posible ofrecer una protección completa contra los sismos.

En respuesta a la demanda de edificaciones más resistentes que mantengan su funcionalidad posterior a la acción sísmica, se han desarrollado diferentes tecnologías, entre las cuales el aislamiento sísmico ha logrado destacar demostrado ser muy efectivo. Esta tecnología es usada principalmente en estructuras de mayor relevancia, como es el caso de hospitales.

Según el artículo 15 de la Norma E.030 (MVCS, 2020), los nuevos proyectos de edificación del sector salud tanto privados como estatales, de los niveles segundo y tercero, de categoría A1 y que se encuentren según la zonificación sísmica en las zonas 3 y 4, deben contar con aislamiento sísmico. En la actualidad el Perú cuenta con cierta cantidad de hospitales sísmicamente aislados con diferentes sistemas, sin embargo, ciudades importantes y vulnerables a eventos sísmicos severos como la ciudad de Ilo, ubicada en la costa de Moquegua, carecen hasta la fecha de hospitales que cuenten con esta tecnología de protección sísmica.

Los sistemas de aislamiento sísmico usualmente están conformados por dispositivos elastoméricos y/o de fricción, sin embargo, estos sistemas presentan comportamientos y modos de falla que varían significativamente, generando diferentes respuestas estructurales.

Por ello el presente trabajo busca evaluar la variación de la respuesta estructural de una edificación hospitalaria sísmicamente aislada, ubicada en la ciudad de Ilo, usando para ello tres sistemas de aislamiento diferentes, conformados por aisladores elastoméricos de núcleo de plomo (LRB), aisladores elastoméricos de alto amortiguamiento (HDR), deslizadores planos de fricción (SL) y aisladores de triple péndulo de fricción (TFP).

1.1. Descripción y formulación del problema

La preocupante disminución de la ocurrencia de sismos frente a las costas del departamento de Moquegua sugiere una acumulación latente de energía, producto de la fricción entre las placas de Nazca y Sudamericana, la cual podría liberarse en cualquier momento (Tavera, 2017).

En el año 2014 la Norma E.030, vigente en ese entonces, tuvo la primera modificación concerniente al aislamiento sísmico de base, la cual indicaba que los establecimientos de salud especificados que requieran de este tipo de protección sísmica debían seguir los lineamientos indicados en el código ASCE/SEI 7 del año 2010. Es recién en el año 2019 que se publica la Norma E.031 de Aislamiento Sísmico, siendo la primera de su tipo.

Es razonable entender que antes de las fechas indicadas anteriormente, no existían establecimientos de salud que cuenten con aislamiento sísmico, y que en la actualidad el Perú presente una deficiencia de infraestructura hospitalaria con estos sistemas, como es el caso de la ciudad de Ilo. Cabe aclarar que el país cuenta con algunas estructuras hospitalarias aisladas ya construidas, en proceso de construcción, y proyectos que aún están en curso, mostrándose en la tabla 1 algunos ejemplos.

Tabla 1*Edificaciones hospitalarias con aislamiento sísmico en Perú*

Proyecto	Lugar	Dispositivo	Cantidad	Niveles
Hospital Coracora	Ayacucho	TFP	66	5
Hospital San Francisco	Ayacucho	TFP	68	5
Hospital San Miguel	Ayacucho	TFP	29	4
Hospital Cangallo	Ayacucho	TFP	36	4
Hospital María Auxiliadora	Amazonas	TFP	55	3
Hospital de Cajamarca	Cajamarca	TFP	116	8
Hospital Alto Inclán	Arequipa	TFP	91	3
Hospital Goyeneche	Arequipa	TFP	192	6
Hospital de Talara	Piura	TFP	181	6
Clínica de Medicina Deportiva	Callao	TFP	23	3
Hospital de Rioja	San Martín	LRB + SL	100	2 y 3
Hospital Regional de Moquegua	Moquegua	LRB + SL	216	2, 3 y 4
Hospital de Bella Vista	San Martín	LRB + SL	64	1 a 4
Hospital de Tocache	San Martín	LRB + SL	109	4 y 3
Hospital Regional Daniel Alcides Carrión	Cerro de Pasco	HDR + SL	186	6 y 3
Hospital Santa Gema de Yurimaguas	Loreto	HDR + SL	172	4 y 2
Hospital de la Policía Nacional del Perú (Luis N. Saenz)	Lima	HDR + SL	213	6 y 3
Hospital Materno Infantil	Puno	HDR + SL	139	3
Clínica Hamilton Naki	Junín	HDR + SL	92	4
Clínica de Especialidades Médicas	Lima	HDR + SL	39	6

Nota. Adaptado de “Experiencia nacional en edificaciones con sistemas de protección sísmica”, por Talavera (2017).

Se observa en la tabla 1 que los sistemas de aislamiento sísmico más usados cuentan con dispositivos de triple péndulo de fricción (TFP), aisladores elastoméricos de núcleo de plomo (LRB), aisladores elastoméricos de alto amortiguamiento (HDR) y deslizadores planos de fricción (SL).

Lo previamente descrito permite inferir que la ciudad de Ilo requiere de infraestructura hospitalaria sísmicamente aislada capaz de mantener la funcionalidad continua posterior a eventuales sismos, por otro lado, se puede observar que hay varios tipos de sistemas de aislamiento sísmico que pueden ser utilizados para este fin, los cuales responderían de manera diferente ante las sollicitaciones sísmicas, influyendo en la respuesta estructural y dando distintos resultados, motivo por el cual la presente investigación busca determinar cómo los sistemas de aislamiento influyen en la respuesta de la estructura y cual sistema permite un mejor desempeño en la edificación hospitalaria analizada en este trabajo y ubicada en la ciudad de Ilo.

1.1.1. Problema general

¿En qué medida influye el uso de tres sistemas de aislamiento sísmico en la respuesta estructural de una edificación hospitalaria ubicada en la ciudad de Ilo?

1.1.2. Problemas específicos

- ¿De qué manera influye el uso de tres sistemas de aislamiento sísmico en las derivas de entrepiso de una edificación hospitalaria ubicada en la ciudad de Ilo?
- ¿Cómo influye el uso de tres sistemas de aislamiento sísmico en las aceleraciones de piso de una edificación hospitalaria ubicada en la ciudad de Ilo?
- ¿De qué modo influye el uso de tres sistemas de aislamiento sísmico en el desplazamiento máximo del sistema de aislamiento de una edificación hospitalaria ubicada en la ciudad de Ilo?
- ¿Cuánto influye el uso de tres sistemas de aislamiento sísmico en la fuerza cortante que actúa en la base de la superestructura aislada de una edificación hospitalaria ubicada en la ciudad de Ilo?

- ¿En qué medida influye el uso de tres sistemas de aislamiento sísmico en la fuerza cortante que actúa en el sistema de aislamiento de una edificación hospitalaria ubicada en la ciudad de Ilo?

1.2. Antecedentes

Valerio (2015), en su investigación titulada *Análisis comparativo de un edificio fijo en la base vs un edificio aislado utilizando 4 tipos de aisladores sísmicos*, tuvo como objetivo de investigación comparar la respuesta estructural de un edificio de concreto armado en base fija y sísmicamente aislado, utilizando para esto último cuatro tipos de dispositivos de aislamiento, usando el análisis tiempo-historia, donde los dispositivos utilizados fueron: HDR, LRB, aisladores de péndulo de fricción simple (SFP) y Roll-n-Cage (RNC). Fue un estudio de tipo cuantitativo con alcance explicativo. La población de estudio comprende un edificio de concreto armado de siete pisos. La muestra fue de tipo no probabilística. Los instrumentos empleados fueron fichas de observación directa. Los resultados más óptimos que obtuvo esta investigación fueron derivas de piso de 0.0020 usando RNC, aceleraciones de piso de 3.54 m/seg² usando RNC, fuerza cortante en la base del edificio de 907 tonf usando RNC y el desplazamiento máximo del edificio de 1.19 m usando RNC y mínimo de 0.47 m usando HDR. Esta investigación concluyó que el aislador más efectivo es el RNC, teniendo como resultados, respecto al edificio de base fija, la reducción de la deriva de piso en un 86%, la reducción de la aceleración del piso superior en un 92%, la reducción de la fuerza cortante en la base en un 84% y el incremento del desplazamiento en un 333%.

Villavicencio (2015), en su investigación titulada *Análisis sísmico estructural comparativo para edificios con aisladores de base tipo elastoméricos y friccionantes, para los diferentes tipos de suelos del Ecuador*, tuvo como objetivo de investigación el analizar comparativamente dispositivos de aislamiento tanto elastoméricos como friccionantes en diferentes tipos de suelos (A, B, C, D y E), donde los dispositivos utilizados fueron: LRB y

SFP. Fue un estudio de tipo cuantitativo con alcance explicativo. La población de estudio comprende dos edificios de diez pisos cada uno, el primero está conformado por un sistema aporticado y el segundo por muros de corte en ambos sentidos. La muestra fue de tipo no probabilística. Los instrumentos empleados fueron fichas de observación directa. Los principales resultados que obtuvo esta investigación fueron que, para el caso de la cortante basal, el edificio aporticado empotrado frente al sísmicamente aislado presentó una reducción de 5% y 7% (promedio de todos los tipos de suelo) usando LRB y SFP respectivamente, mientras que para el edificio con muros de corte fue de 42% y 43% (promedio de todos los tipos de suelo) usando LRB y SFP respectivamente; por otro lado, los máximos desplazamientos para el edificio aporticado empotrado frente al sísmicamente aislado presentaron una reducción de 17% (promedio) usando LRB pero una amplificación de desplazamientos al usar SFP, mientras que para el edificio con muros de corte se presentó una reducción de 43% (promedio) usando LRB pero una amplificación de desplazamientos al usar SFP; para el caso de las derivas máximas, el edificio aporticado y el edificio con muros de corte presentaron una reducción de derivas de aproximadamente 50% (promedio) al ser aislados por los sistemas LRB y SFP; Se concluyó que los sistemas de aislamiento con LRB presentaron una mejor respuesta sísmica tanto para los edificios aporticados como para los edificios con muros de corte en los diferentes tipos de suelos, ya que redujeron más eficientemente las fuerzas cortantes basales, los desplazamientos y derivas de piso.

Chacón (2018), en su investigación titulada *Eficiencia de respuesta sísmica de la infraestructura del hospital materno infantil de la ciudad de Juliaca, diseñado con aisladores de base considerando la flexibilidad del suelo*, tuvo como objetivo de investigación el determinar la respuesta sísmica más eficiente de los dispositivos HDR, LRB y TFP, considerando la interacción suelo-estructura (ISE), en el hospital Materno Infantil de la ciudad de Juliaca. Fue un estudio de tipo cuantitativo con alcance explicativo. La población de estudio

fue el hospital Materno Infantil de la ciudad de Juliaca. La muestra fue de tipo no probabilístico. Los instrumentos empleados fueron fichas de observación directa. Los resultados más óptimos que se obtuvieron fueron, que las fuerzas cortantes en la base de la estructura sobre el sistema de aislamiento, sin considerar ISE, fueron de 197.9 tonf en el eje X y 192.3 tonf en el eje Y usando TFP, mientras que considerando ISE, fueron de 187.1 tonf en el eje X y de 187.4 tonf en el eje Y usando TFP; por otro lado, las derivas máximas de entrepiso, sin considerar ISE, fueron de 0.0019 en el eje X y 0.0022 en el eje Y usando TFP, mientras que considerando ISE, fueron de 0.0020 en el eje X y 0.0024 en el eje Y usando TFP; por otra parte, los desplazamientos laterales máximos del sistema de aislamiento, sin considerar ISE, fueron de 43.74 cm en el eje X y 43.63 cm en el eje Y usando TFP, mientras que considerando ISE, fueron de 40.18 cm en el eje X y 40.13 cm usando TFP; para el caso de las aceleraciones máximas, sin considerar ISE, fueron de 160.49 cm/seg² en el eje X y 161.58 cm/seg² en el eje Y usando TFP, mientras que considerando ISE, fueron de 171.25 cm/s² en el eje X y 168.26 cm/seg² en el eje Y usando TFP. Se concluyó en esta investigación que el sistema más eficiente es el que cuenta con aisladores TFP.

Melendrez y Pantoja (2020), en su investigación titulada *Análisis comparativo de un edificio con cuatro tipos de aisladores sísmicos en el distrito de la Victoria*, tuvieron como objetivo de investigación el realizar el análisis de una edificación sísmicamente aislada mediante cuatro dispositivos de aislamiento, donde los dispositivos utilizados fueron: HDR, LRB, SFP y TFP. Fue un estudio de tipo cuantitativo con alcance correlacional. La población de estudio comprende edificaciones de concreto armado con aislamiento sísmico en Perú. La muestra está constituida por edificaciones de concreto armado sísmicamente aisladas mediante dispositivos elastoméricos y friccionantes en el departamento de Lima. Los instrumentos empleados fueron hojas de cálculo y los softwares especializados: Seismo Signal, Seismo Match y Etabs. Los principales resultados para el análisis tiempo-historia fueron que los

aisladores TFP producen la menor fuerza cortante en la base (4530.30 Klb en promedio), la menor fuerza sobre el sistema de aislamiento (4175.45 Klb en promedio), el máximo desplazamiento en la interfaz de aislamiento (26.41 in en promedio) y las derivas de entrepiso más pequeñas y uniformes respecto a los otros tipos de aisladores. Esta investigación concluyó que los aisladores TFP generan derivas de piso relativamente uniformes y por debajo de lo indicado en la Norma E.031, además permiten una mayor reducción de los esfuerzos transmitidos a la superestructura, pero con mayores desplazamientos.

Tipula (2024), en su investigación titulada *Análisis comparativo del comportamiento estructural de una edificación multifamiliar con reforzamiento sísmico mediante tres tipos de aisladores, Juliaca-2023*, tuvo como objetivo de investigación el evaluar y comparar el comportamiento estructural de los dispositivos LRB, de doble péndulo de fricción (DFP) y TFP sujetos a la normativa vigente, en una edificación multifamiliar en Juliaca. Fue un estudio de enfoque cuantitativo con nivel descriptivo. La población de estudio comprende viviendas multifamiliares aporticadas en Juliaca. La muestra tomada es un edificio multifamiliar aporticado de 6 niveles en Juliaca. Los instrumentos empleados fueron listas de verificación y el software Etabs. Los principales resultados para el análisis tiempo-historia fueron que los aisladores LRB generaron las mayores reducciones de derivas de entrepiso respecto a la estructura en base fija, siendo de 80.95% para el sismo de La Libertad, 80.76% para el sismo de Lambayeque, 42.34% para el sismo de Piura. Este estudio concluyó que la mejor opción para el aislamiento sísmico de la edificación multifamiliar evaluada era mediante el uso de aisladores LRB.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

- Determinar en qué medida influye el uso de tres sistemas de aislamiento sísmico en la respuesta estructural de una edificación hospitalaria ubicada en la ciudad de Ilo.

1.3.2. Objetivos específicos

- Definir de qué manera influye el uso de tres sistemas de aislamiento sísmico en las derivas de entrepiso de una edificación hospitalaria ubicada en la ciudad de Ilo.
- Establecer cómo influye el uso de tres sistemas de aislamiento sísmico en las aceleraciones de piso de una edificación hospitalaria ubicada en la ciudad de Ilo.
- Determinar de qué modo influye el uso de tres sistemas de aislamiento sísmico en el desplazamiento máximo del sistema de aislamiento de una edificación hospitalaria ubicada en la ciudad de Ilo.
- Precisar cuánto influye el uso de tres sistemas de aislamiento sísmico en la fuerza cortante que actúa en la base de la superestructura aislada de una edificación hospitalaria ubicada en la ciudad de Ilo.
- Calcular en qué medida influye el uso de tres sistemas de aislamiento sísmico en la fuerza cortante que actúa en el sistema de aislamiento de una edificación hospitalaria ubicada en la ciudad de Ilo.

1.4. Justificación

Según la Norma E.030 (MVCS, 2020b, p. 80) la localidad de Ilo está emplazada dentro de la zona sísmica 4, lo que implica que establecimientos de salud de segundo y tercer nivel de esta ciudad deben contar de forma obligatoria con sistemas de aislamiento sísmico (MVCS, 2020b, p. 18), sin embargo, en la actualidad esta ciudad no cuenta con ninguna edificación con estas características. Esta investigación busca aportar al conocimiento de profesionales responsables de proyectos hospitalarios que requieran de sistemas de aislamiento sísmico que generen una mejor respuesta estructural, y preserven en mayor medida la integridad de la edificación, elementos no estructurales y su contenido, posterior a un eventual sismo, manteniendo la funcionalidad continua en estructuras que presenten condiciones sísmicas y geotécnicas similares a la edificación evaluada en esta investigación.

1.5. Hipótesis

1.5.1 Hipótesis general

- El sistema de aislamiento sísmico con dispositivos de triple péndulo de fricción (TFP) permitirá obtener mejores resultados en la respuesta estructural de la edificación hospitalaria evaluada, ubicada en la ciudad de Ilo.

1.5.2 Hipótesis específicas

- El sistema de aislamiento sísmico con dispositivos de triple péndulo de fricción (TFP) permitirá obtener mejores resultados en las derivas de entrepiso de la edificación hospitalaria evaluada, ubicada en la ciudad de Ilo.

- El sistema de aislamiento sísmico con dispositivos de triple péndulo de fricción (TFP) permitirá obtener mejores resultados en las aceleraciones de piso de la edificación hospitalaria evaluada, ubicada en la ciudad de Ilo.

- El sistema de aislamiento sísmico con dispositivos de triple péndulo de fricción (TFP) permitirá obtener mejores resultados en el desplazamiento máximo del sistema de aislamiento de la edificación hospitalaria evaluada, ubicada en la ciudad de Ilo.

- El sistema de aislamiento sísmico con dispositivos de triple péndulo de fricción (TFP) permitirá obtener mejores resultados en la fuerza cortante que actúa en la base de la superestructura aislada de la edificación hospitalaria evaluada, ubicada en la ciudad de Ilo.

- El sistema de aislamiento sísmico con dispositivos de triple péndulo de fricción (TFP) permitirá obtener mejores resultados en la fuerza cortante que actúa en el sistema de aislamiento de la edificación hospitalaria evaluada, ubicada en la ciudad de Ilo.

II. MARCO TEÓRICO

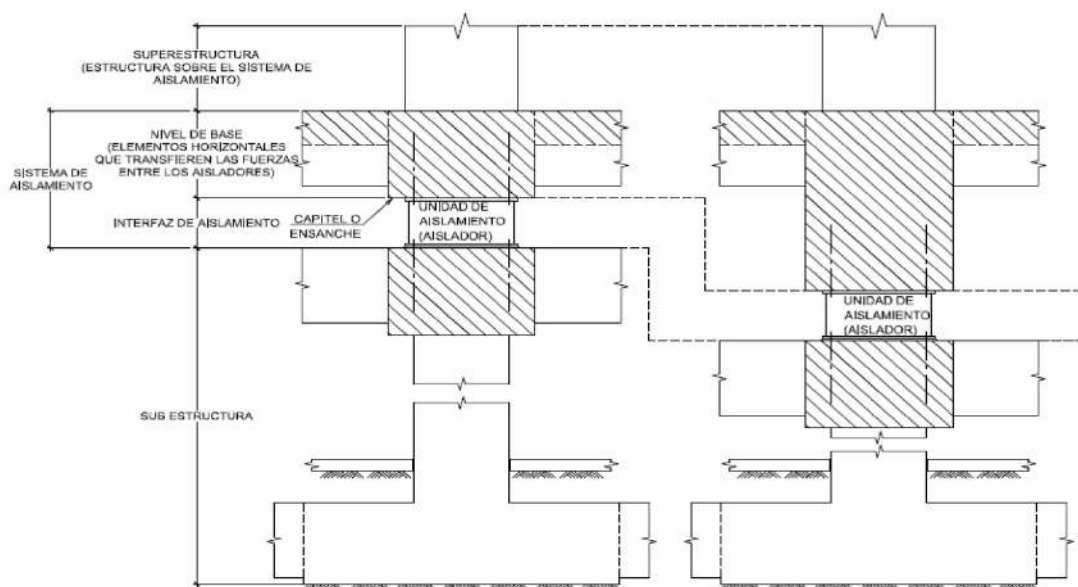
2.1. Bases teóricas sobre el tema de investigación

Aislamiento sísmico

Es un sistema pasivo que busca evitar en lo posible que las vibraciones sísmicas del suelo sean transferidas a la superestructura (Genatios y Lafuente, 2016). Esta tecnología consiste en interponer entre la superestructura y el suelo soportes de baja rigidez lateral, que usualmente son dispositivos de caucho laminado o dispositivos deslizantes, los cuales concentran grandes deformaciones producidas por la acción de cargas sísmicas, al tiempo que la superestructura no presenta deformaciones relevantes (De Domenico et al., 2020). En la figura 1 se puede observar que un sistema de aislamiento sísmico lo conforman la interfaz de aislamiento, zona en la que están ubicados los aisladores, y el nivel de base, en el que se sitúan vigas, losas y capiteles, que transfieren las fuerzas y momentos a los aisladores.

Figura 1

Sistema de aislamiento sísmico



Nota. Tomada de *Sistema de aislamiento sísmico*, por Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (2020).

Dispositivos de aislamiento sísmicos

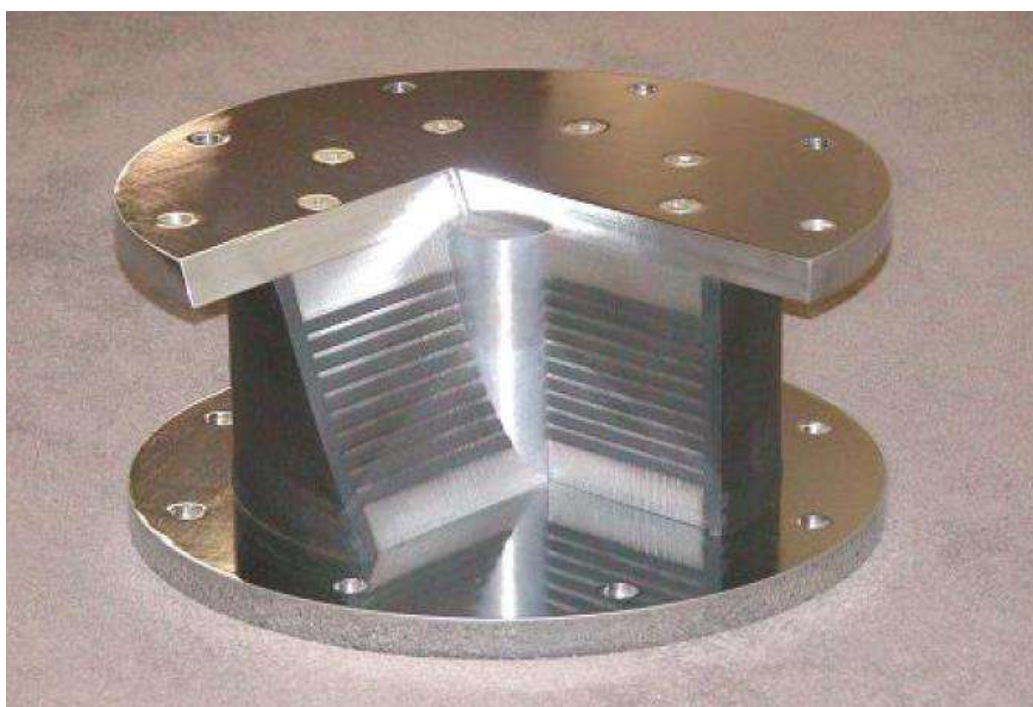
La tabla 1 exhibe sistemas de aislamiento sísmico en hospitales del Perú conformados esencialmente por dispositivos LRB, HDR, SL y TFP.

2.2.1 Aisladores elastoméricos de núcleo de plomo (LRB)

Estos dispositivos están constituidos por un núcleo metálico compuesto por plomo y capas horizontales alternadas entre caucho natural y láminas de acero inoxidable (Constantinou et al., 2011). La energía entrante debido a la acción de cargas sísmica es disipada en forma de calor a través del núcleo de plomo, lo que sucede cuando este incurre en deformaciones plásticas, mientras que el caucho permite restituir el dispositivo a su ubicación original luego del evento sísmico, donde el plomo que constituye el núcleo metálico regresa a tener sus propiedades mecánicas iniciales (Mendo, 2015).

Figura 2

Constitución interna de un dispositivo LRB

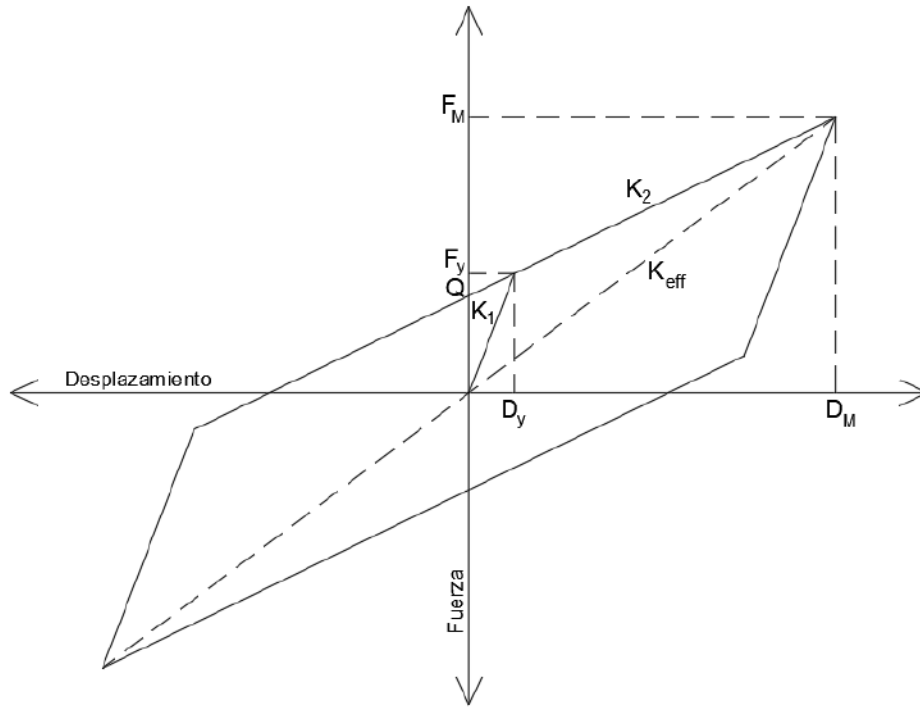


Nota. Tomada de *Internal Construction of a Lead-Rubber Bearing (Courtesy of DIS)*, por Constantinou et al. (2011), University at Buffalo.

El comportamiento fuerza lateral - desplazamiento de los aisladores LRB puede ser idealizado mediante el lazo histerético bilineal mostrado en la figura 3, que representa una buena aproximación.

Figura 3

Lazo histerético bilineal de un dispositivo elastomérico



Nota. Adaptado de *Propiedades nominales del modelo bilineal fuerza-deformación del aislador*, por Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (2020).

Del modelo bilineal para un dispositivo elastomérico se pueden obtener las siguientes ecuaciones en base a su geometría:

$$D_y = \frac{Q}{K_1 - K_2}$$

$$F_y = Q + K_2 D_y$$

$$F_M = Q + K_2 D_M$$

$$E_d = 4Q(D_M - D_y)$$

$$E_s = 0.5K_{eff}D_M^2$$

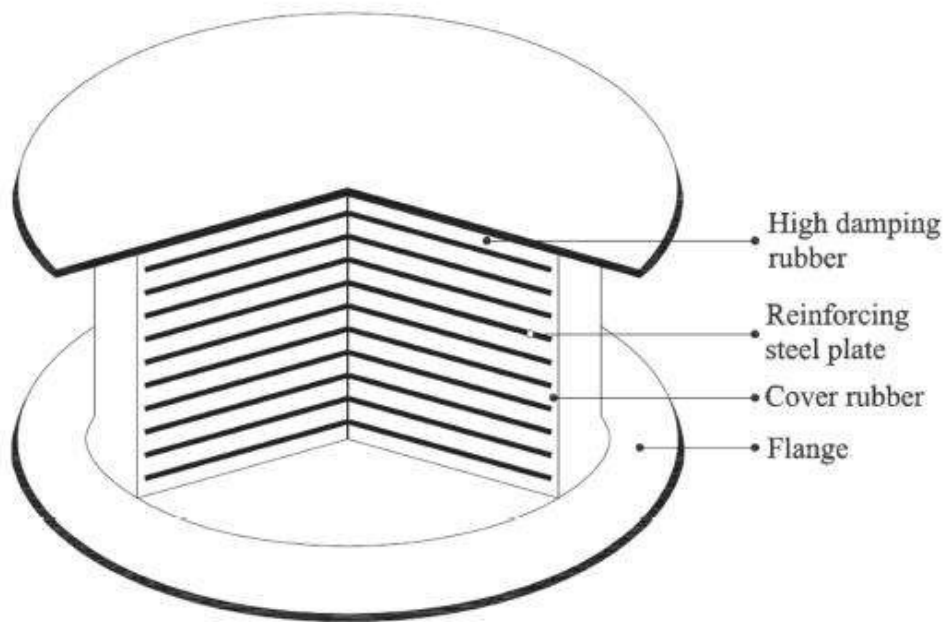
Donde, para una unidad de aislamiento sísmico:

- K_1 : Rigidez elástica.
- K_2 : Rigidez post-fluencia.
- K_{eff} : Rigidez efectiva.
- Q : Fuerza característica o de activación.
- F_y : Fuerza de fluencia.
- F_M : Fuerza máxima.
- D_y : Desplazamiento de fluencia.
- D_M : Desplazamiento máximo traslacional.
- E_d : Energía disipada en un ciclo de histéresis.
- E_s : Energía de deformación máxima elástica.

2.2.2 Aisladores elastoméricos de alto amortiguamiento (HDR)

Estos dispositivos presentan similitudes con los LRB, sin embargo, no presentan núcleo, en su lugar se le añade aditivos al elastómero para mejorar su comportamiento ante cargas laterales (Melendrez y Pantoja, 2020). Estos dispositivos son más sensibles a variaciones térmicas en comparación con los LRB (Guaygua, 2015).

El comportamiento fuerza lateral - desplazamiento de los dispositivos HDR puede ser idealizado mediante un modelo bilineal (Janampa, 2018), motivo por el cual para estos dispositivos también se usará el lazo histerético mostrado en la figura 3 y las fórmulas correspondientes.

Figura 4*Sección transversal de un dispositivo HDR*

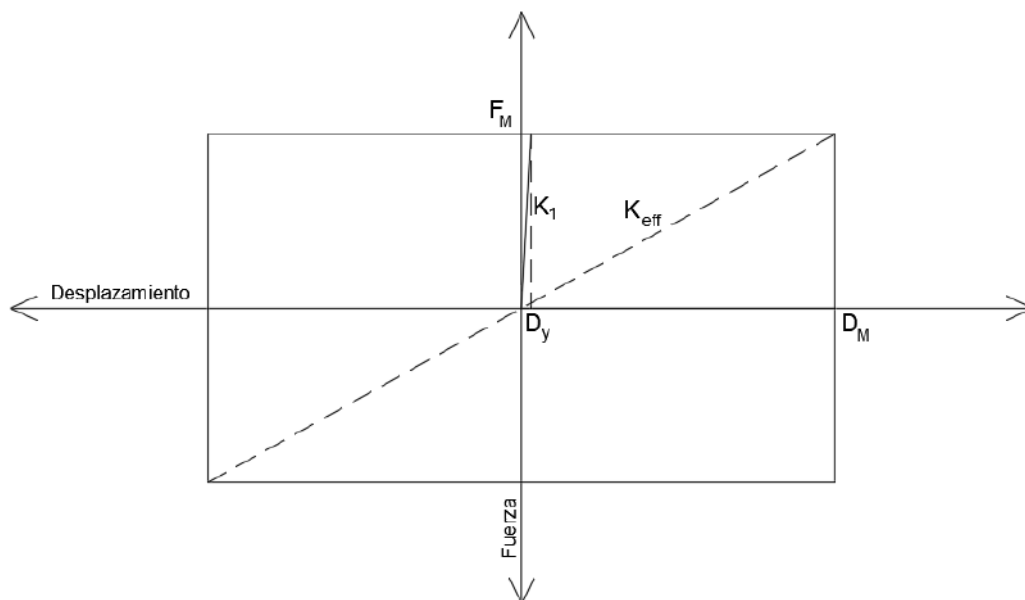
Nota. Tomada de “*Research and development of high-performance high-damping rubber Materials for high-damping rubber isolation bearings: A review*”, por Chen et al. (2022), *Polymers*, 14(12).

2.2.3 Deslizadores planos de fricción (SL)

Los dispositivos SL están conformados por una placa deslizante superior y otra inferior de acero pulido, comúnmente recubiertas por politetrafluoroetileno, también llamado teflón o PTFE, con el objetivo de que estas superficies tengan un bajo coeficiente de rozamiento (Vaiana et al., 2019). Estos dispositivos no cuentan con capacidad restitutiva, no pudiendo regresar a su posición inicial por sí mismos, por lo que deben trabajar conjuntamente con LRB y/o HDR, sin embargo, el uso de dispositivos SL permite una reducción de costos al ser más económicos (López et al., 2011).

Figura 5*Instalación de dispositivo SL*

Nota. Tomada de *Apoyo deslizante plano*, por López et al. (2011), Corporación de Desarrollo Tecnológico, Cámara Chilena de la Construcción.

Figura 6*Lazo histerético bilineal de dispositivo SL*

Nota. Adaptada de “Nonlinear dynamic analysis of seismically base-isolated structures by a novel opensees hysteretic material model”, por Vaiana et al. (2021), *Applied Sciences*, 11(3).

Del modelo bilineal para un dispositivo SL se pueden obtener las siguientes ecuaciones en base a su geometría:

$$F_M = F_y = Q$$

$$K_{eff} = \frac{F_M}{D_M}$$

$$K_1 = \frac{F_M}{D_y}$$

$$E_d = 4F_M D_M$$

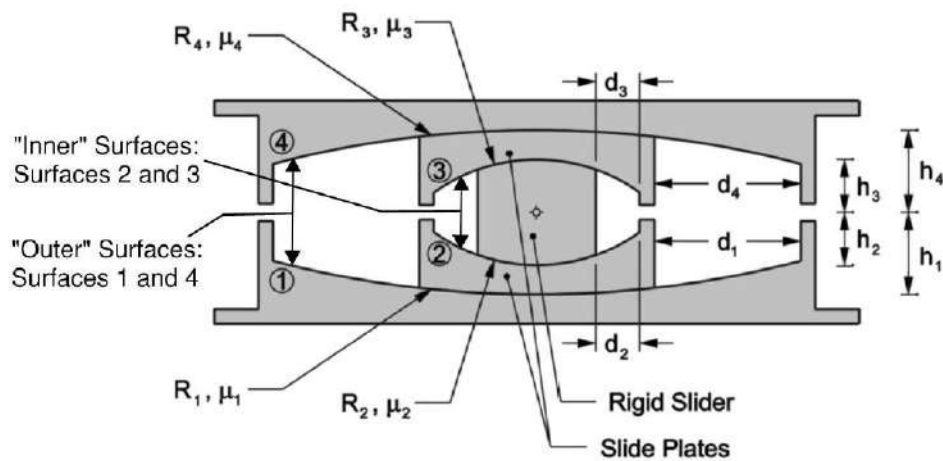
$$E_s = 0.5F_M D_M$$

2.2.4. Aisladores de triple péndulo de fricción (TFP)

Los dispositivos TFP presentan cuatro superficies esféricas deslizantes, dos placas deslizantes internas y una articulación deslizante rígida en el centro, pudiendo experimentar hasta cinco regímenes de deslizamientos, presentando un comportamiento adaptativo, donde es posible cambiar y regular la rigidez, fricción efectiva y amortiguamiento en función a los desplazamientos laterales (Calvi y Calvi, 2018).

Figura 7

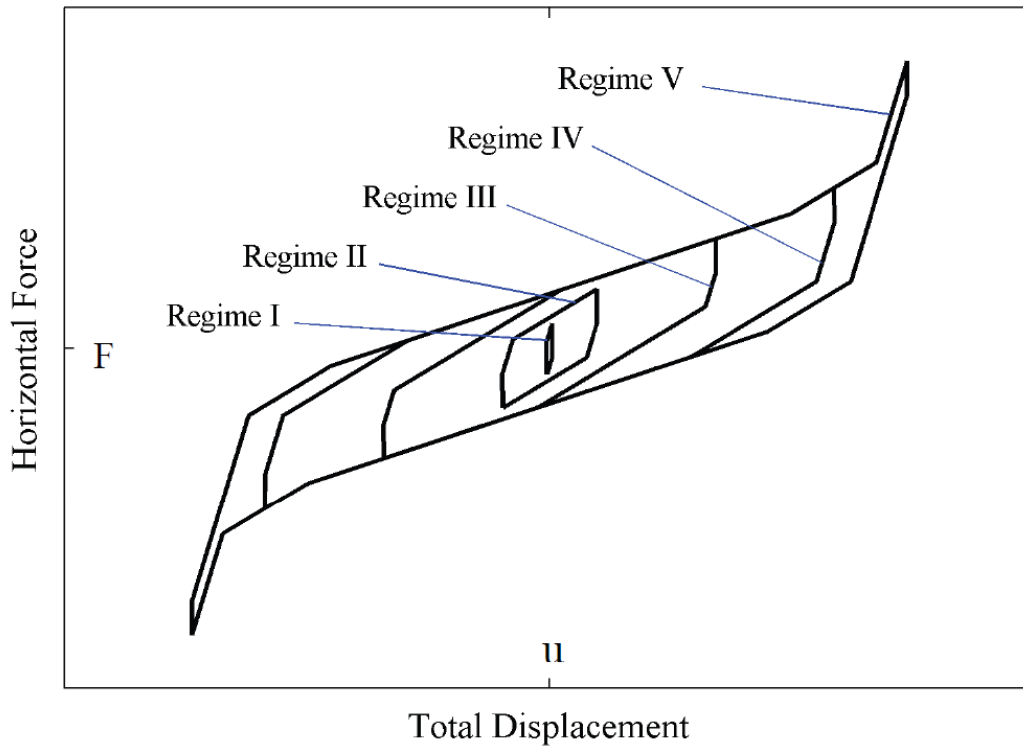
Sección transversal de un dispositivo TPF



Nota. Tomada de *Triple Friction Pendulum Cross Section, Definition of Parameters*, por McVitty y Constantinou (2015), University at Buffalo.

Figura 8

Lazos histeréticos fuerza-deformación de un aislador TFP



Nota. Tomada de *Force-Displacement Loops of Triple FP Bearing*, por Constantinou et al. (2011), University at Buffalo.

McVitty y Constantinou (2015) presentaron un modelo en el que redujeron el número de variables de 16 a 6 parámetros geométricos y de 4 a 2 los parámetros de fricción, donde:

$$R_1 = R_4 \gg R_2 = R_3$$

$$\mu_2 = \mu_3 < \mu_1 = \mu_4$$

$$d_1 = d_4 \text{ y } d_2 = d_3$$

$$h_1 = h_4 \text{ y } h_2 = h_3$$

$$R_{i,eff} = R_i - h_i$$

$$d_i^* = \frac{R_{i,eff}}{R_i} d_i$$

Esta menor cantidad de parámetros redujo la cantidad de regímenes del dispositivo TFP de cinco a tres.

Tabla 2*Comportamiento de un dispositivo TFP de tres regímenes*

Régimen	Condición	Relación Fuerza lateral - Desplazamiento
I	Se presentan desplazamientos en los platos internos 2 y 3.	$0 \leq u \leq u^*$ $u^* = 2(\mu_1 - \mu_2)R_{2,eff}$ $F = \left(\frac{W}{2R_{2,eff}} \right) u + \mu_2 W$
II	El movimiento se detiene en las superficies 2 y 3, y el desplazamiento ocurre en las placas 1 y 4.	$u^* \leq u \leq u^{**}$ $u^{**} = u^* + 2d_1^*$ $F = \left(\frac{W}{2R_{1,eff}} \right) (u - u^*) + \mu_1 W$
III	Las placas interiores se apoyan en las superficies 1 y 4, y el desplazamiento ocurre en las placas 2 y 3.	$u^{**} \leq u \leq u_{cap}$ $u_{cap} = 2d_1^* + 2d_2^*$ $F = \left(\frac{W}{2R_{2,eff}} \right) (u - u^{**}) + \left(\frac{W}{2R_{1,eff}} \right) (u^{**} - u^*) + \mu_1 W$

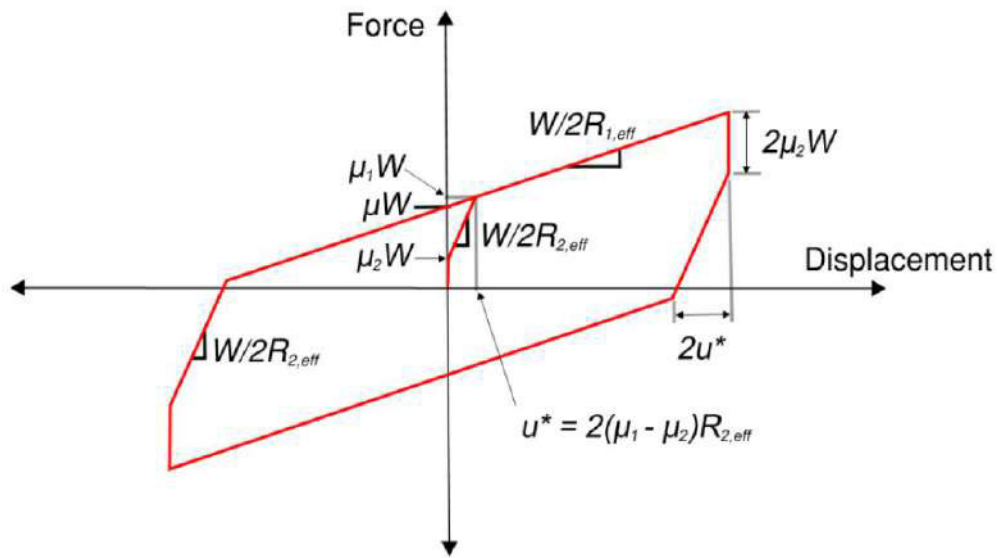
Nota. Adaptado de *Force-Displacement Behavior for a "Special" Triple FPR Isolator*, por McVitty y Constantinou (2015), University at Buffalo.

Por otro lado, McVitty y Constantinou (2015) mencionan que el aislador TFP debe alcanzar los desplazamientos generados por el sismo máximo considerado (SMC) durante el régimen II, donde la relación entre la fuerza lateral y el desplazamiento pueden ser representados mediante el lazo histerético trilineal mostrado en la figura 9, donde la fuerza característica se calcula con:

$$\mu W = \left[\mu_1 - (\mu_1 - \mu_2) \frac{R_{2,eff}}{R_{1,eff}} \right] W$$

Figura 9

Lazo histerético trilineal de un dispositivo TFP



Nota. Tomada de *Tri-linear Force-Displacement Behavior of Special Triple FP up to Regime II*, por McVitty y Constantinou (2015), University at Buffalo.

Donde, para el aislador TFP:

- W : Carga vertical sobre el dispositivo.
- μ_i : Coeficiente de fricción del plato i .
- R_i : Radio de curvatura del plato i .
- $R_{i,eff}$: Radio efectivo del plato i .
- d_i : Desplazamiento del plato i .
- d_i^* : Capacidad de desplazamiento del plato i .
- u^* : Desplazamiento máximo en el régimen 1.
- u^{**} : Desplazamiento máximo en el régimen 2.
- u_{cap} : Desplazamiento máximo en el régimen 3.

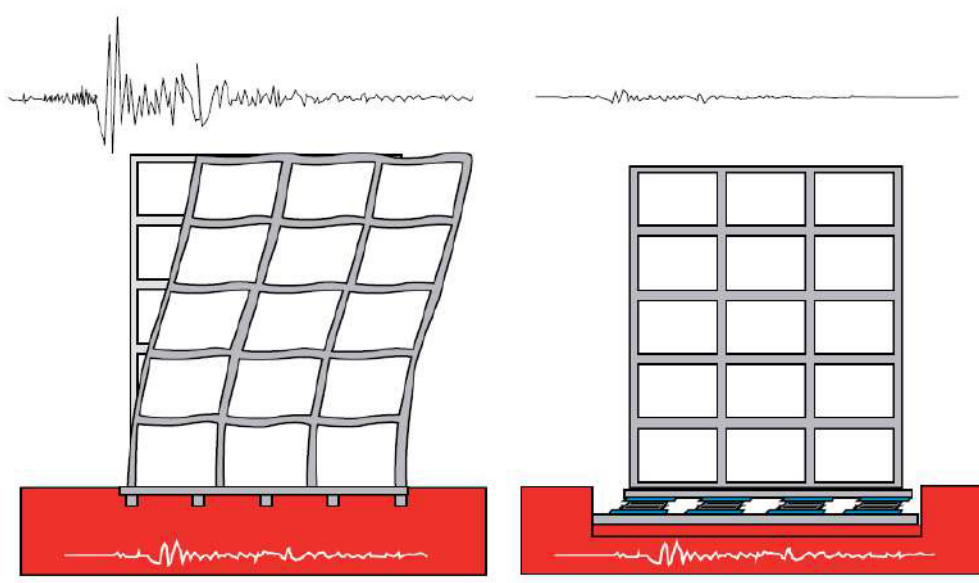
($i = 1, 2, 3, 4$)

Comportamiento de un edificio con aislamiento sísmico

El aislar sísmicamente una edificación consigue reducir tanto aceleraciones como deformaciones en la superestructura, resultado de la baja rigidez lateral de los dispositivos que emplea, reduciendo la demanda sísmica producto del aumento del periodo fundamental junto al amortiguamiento (Villagómez, 2015).

Figura 10

Comparación de la respuesta sísmica de un edificio con base fija y aislada

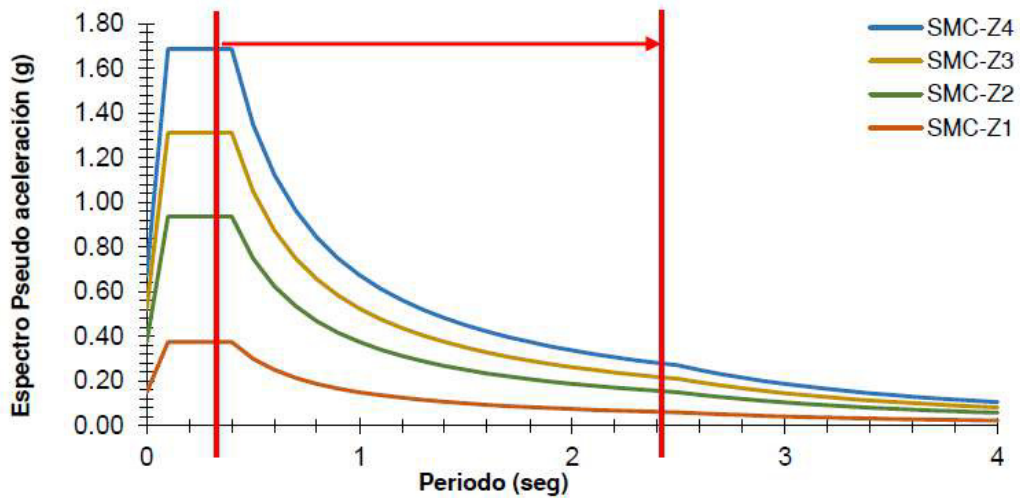


Nota. Tomada de *Comparación de edificio sin disipadores y edificio con disipadores de energía*, por López et al. (2011), Corporación de Desarrollo Tecnológico, Cámara Chilena de la Construcción.

Melendrez y Pantoja (2020) indican que un mayor periodo reduce la demanda de aceleraciones; la figura 11 presenta cuatro espectros elásticos para los sismos máximos considerados (SMC) correspondientes a las cuatro zonas sísmicas del país, para un suelo S_1 con un amortiguamiento de 5%. Por otro lado, estos mismos autores mencionan que generalmente el incremento del amortiguamiento también reduce la demanda de aceleraciones; la figura 12 presenta cuatro espectros elásticos para SMC con un factor S_1 en la zona sísmica 4, pero con amortiguamientos de 5%, 10%, 15% y 20%.

Figura 11

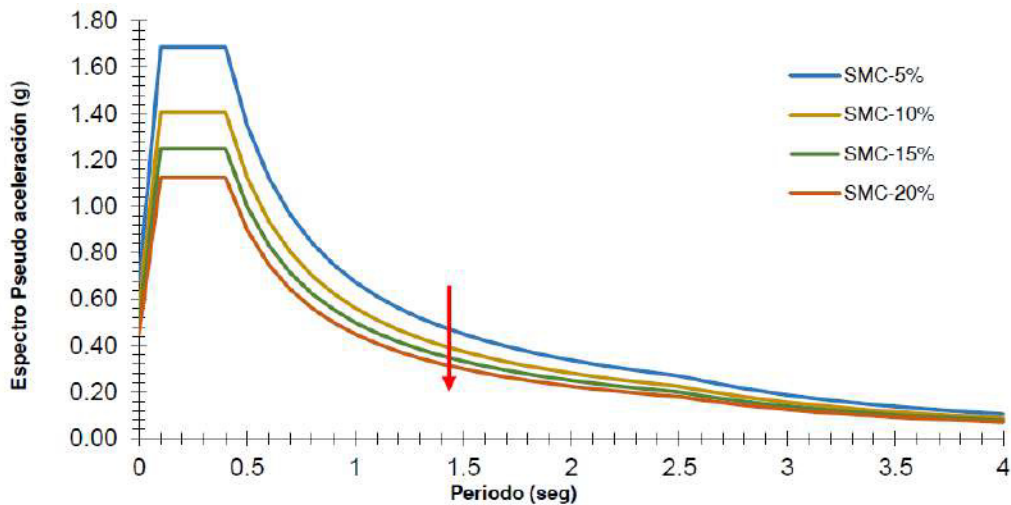
Reducción de aceleraciones por aumento del periodo en espectros elásticos



Nota. Tomada de *Efecto del Cambio de Periodo en la Aceleración*, por Melendrez y Pantoja (2020), Universidad Ricardo Palma.

Figura 12

Reducción de aceleraciones por aumento del amortiguamiento en espectros elásticos



Nota. Tomada de *Efecto del Cambio de Amortiguamiento en la Aceleración*, por Melendrez y Pantoja (2020), Universidad Ricardo Palma.

La respuesta estructural se entiende como la forma en que una estructura se comporta ante cargas externas aplicadas sobre la misma (Mamani, 2023), la cual se puede controlar y cuantificar mediante: las derivas de entrepiso, las aceleraciones de piso, el desplazamiento

máximo del sistema de aislamiento, la fuerza cortante en la base de la superestructura sobre el sistema de aislamiento y la fuerza cortante en el sistema de aislamiento.

Derivas de entrepiso

La Norma E.031 (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento [MVCS], 2020c, p. 34) indica en el artículo 26 que la máxima deriva de entrepiso obtenida como resultado de un análisis tiempo-historia no debe exceder de 0.005 para una estructura aislada. Sin embargo, en el capítulo 5 del manual técnico HAZUS-MH MR4 (Federal Emergency Management Agency [FEMA], 2003) se indica que, para el tipo de edificación evaluada en esta investigación, la máxima deriva de entrepiso no debe exceder de 0.0033.

Aceleraciones de piso

Los sismos pueden generar daños importantes en elementos no estructurales y elementos estructurales que no formen parte del sistema sismorresistente de una edificación, sin embargo, estos daños pueden ser disminuidos al controlar los efectos inerciales del sismo mediante la reducción de las aceleraciones de piso (Barbosa et al., 2018).

Aceleraciones de piso reducidas en la superestructura es uno de los efectos benéficos del uso del aislamiento sísmico, lo cual se puede apreciar en las figuras 11 y 12. La Norma E.031 (MVCS, 2020c) no indica un límite para aceleraciones de piso, sin embargo, el capítulo 5 de HAZUS-MH MR4 (FEMA, 2003) indica que estas aceleraciones no deben exceder 0.30g.

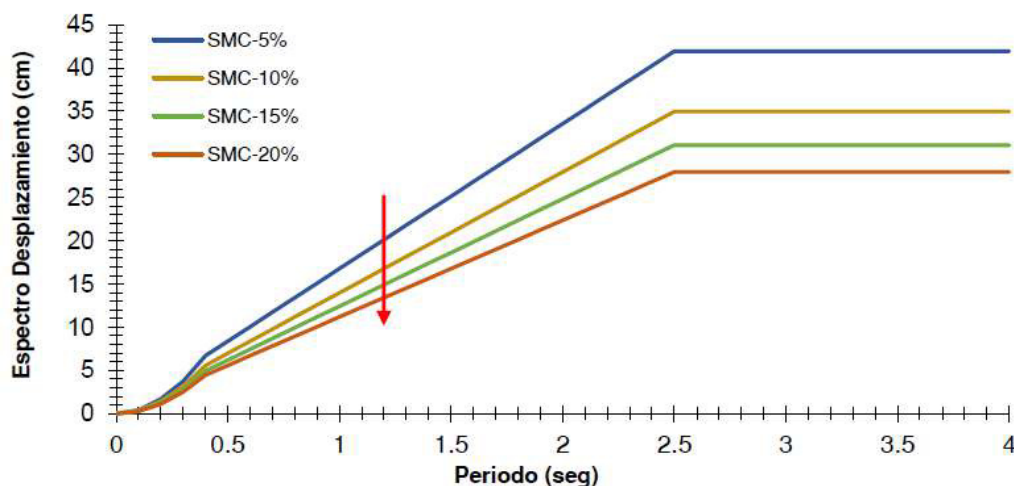
Desplazamiento máximo del sistema de aislamiento

El desplazamiento horizontal que presentan los aisladores requiere el cálculo de una junta que evite la colisión con estructuras adyacentes durante un evento sísmico.

Melendrez y Pantoja (2020) indican que al incrementar el amortiguamiento se consigue reducir el desplazamiento (ver figura 13), motivo por el cual podría ser contraproducente aumentar demasiado el amortiguamiento ya que el sistema de aislamiento llegaría a ser muy rígido y no aislaría a la superestructura de manera adecuada.

Figura 13

Reducción de desplazamientos por aumento del amortiguamiento en espectros elásticos



Nota. Tomada de *Efecto del Cambio de Amortiguamiento en el Desplazamiento*, por Melendrez y Pantoja (2020), Universidad Ricardo Palma.

Fuerza cortante en la base de la superestructura aislada

El aislar sísmicamente una edificación produce una disminución relevante de las cargas sísmicas que entran en la superestructura, permitiendo que esta última trabaje muy cerca al rango elástico, por lo que reducir lo más posible estas cargas representa un aislamiento sísmico más óptimo. Estas cargas se pueden cuantificar mediante el cálculo del parámetro señalado como V_s en la Norma E.031 (MVCS, 2020).

Fuerza cortante en el sistema de aislamiento

Estas fuerzas afectan de manera más severa al sistema de aislamiento que a la superestructura al recibir directamente los efectos del sismo, motivo por el cual es recomendable reducir estas cargas, lo que dependerá en gran medida de la configuración y ubicación de los dispositivos de aislamiento. Una forma de cuantificar estas cargas es mediante el cálculo del parámetro V_b mostrado en la Norma E.031 (MVCS, 2020).

Normativa y consideraciones para el análisis estructural

El Perú basa algunas de sus normativas en códigos publicados por instituciones de Estados Unidos de América, un claro ejemplo de esto es el caso es la Norma E.030 y la Norma E.031 vigentes a la fecha, las cuales se fundamentan en el código norteamericano ASCE/SEI 7, pero adaptadas a la realidad sísmica peruana. Sin embargo, en muchos casos estas normativas no son suficientes para realizar ciertos tipos de evaluaciones o análisis, para lo cual se usan otras recomendaciones y consideraciones indicadas en investigaciones de gran confiabilidad, como es el caso del manual técnico HAZUS-MH MR4.

Norma técnica E.030

Esta norma abarca limitadamente el tema de aislamiento sísmico. El artículo 15 indica que edificaciones pertenecientes al rubro de la salud con categoría A1 deben contar con aislamiento sísmico si se encuentran en la zonificación 3 o 4. Por otro lado, el artículo 23 indica que el uso de aislamiento sísmico requiere el cumplimiento de las disposiciones indicadas en el capítulo II, aplicando en lo posible el código ASCE/SEI 7 vigente. Sin embargo, esta normativa es insuficiente para cumplir los requerimientos de sistemas de aislamiento, motivo por el cual el 2019 fue publicada la Norma E.031 para suplir esta deficiencia.

A continuación, se presentan algunos parámetros definidos en el capítulo II de la Norma E.030 (MVCS, 2020b) que son de utilidad para el análisis de estructuras con aislamiento sísmico.

Figura 14*Mapa de las zonas sísmicas del Perú*

Nota. Tomada de *Zonas Sísmicas*, por Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (2020).

Tabla 3*Factores de zona "Z"*

Zona	Z
4	0.45
3	0.35
2	0.25
1	0.10

Nota. Adaptado de *Factores de zona "Z"*, por Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (2020)

Tabla 4*Factores de suelo "S"*

Zona	Perfil de suelo			
	S₀	S₁	S₂	S₃
Z ₄	0.80	1.00	1.05	1.10
Z ₃	0.80	1.00	1.15	1.20
Z ₂	0.80	1.00	1.20	1.40
Z ₁	0.80	1.00	1.60	2.00

Nota. Adaptado de *Factores de suelo "S"*, por Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (2020)

Tabla 5*Períodos T_P y T_L*

Períodos	Perfil de suelo			
	S₀	S₁	S₂	S₃
T_P (seg.)	0.3	0.4	0.6	1.0
T_L (seg.)	3.0	2.5	2.0	1.6

Nota. Adaptado de *Períodos " T_P " y " T_L "*, por Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (2020)

Norma técnica E.031

Esta norma es una guía con las mínimas exigencias necesarias para desarrollar proyectos sísmicamente aislados.

Es importante resaltar que la Norma E.031 del MVCS (2020) indica en la tabla N°1 del artículo 8 que no se permiten irregularidades extremas en edificaciones de categoría A en las zonas sísmicas 4 y 3, permitiendo irregularidades no consideradas como extremas en edificaciones hospitalarias, mientras que por otro lado, la Norma E.030 del MVCS (2020), indica en la tabla N°10 del artículo 21, que no se permite ningún tipo de irregularidad en

edificaciones con categoría A1, en las zonas sísmicas 4, 3 y 2, lo que implica una clara incompatibilidad entre ambas normas. Por estos motivos en esta investigación se trabajó con una estructura regular.

Las combinaciones de carga indicadas en la Norma E.031 del MVCS (2020) son usadas para verificar la estabilidad vertical de los dispositivos de aislamiento sujetos a la acción del SMC, que son las siguientes:

Tabla 6

Combinaciones de carga aplicadas a los dispositivos de aislamiento sísmico

Carga vertical	Combinación de carga
Promedio	1.0 CM + 0.5 CV
Máxima	1.25 (CM+CV) + 1.0 (CSH+CSV)
Mínima	0.9 CM - 1.0 (CSH+CSV)

Nota. Adaptado de *Efectos de las cargas sísmicas y combinaciones de cargas*, por Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (2020).

Donde:

- CM: Carga muerta.
- CV: Carga viva.
- CSH: Carga sísmica horizontal.
- CSV: Carga sísmica vertical.

La Norma E.031 del MVCS (2020) indica en el artículo 13 que se debe considerar la variación de las propiedades de los dispositivos de aislamiento durante su vida útil por efecto de condiciones ambientales, envejecimiento, temperatura, scragging, velocidad de carga y errores de fabricación, los cuales son cuantificados mediante los factores de modificación máximo ($\lambda_{\text{máx}}$) y mínimo ($\lambda_{\text{mín}}$).

Además, según el artículo 13 de la Norma E.031 del MVCS (2020), aquellos dispositivos que cuenten con factores de modificación de sus propiedades sustentados por ensayos e investigaciones confiables son denominados de Clase I, los dispositivos que no cumplan con los requerimientos de la Clase I son denominados de Clase II.

Tabla 7

Factores de modificación de las propiedades de los dispositivos de Clase I

Factor de modificación	Interfaz no lubricada	LRB		HDR	
Variable	μ o Q	K_2	Q	K_2	Q
$\lambda_{\text{máx}}$	1.60	1.30	1.50	2.00	1.70
$\lambda_{\text{mín}}$	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80

Nota. Adaptado de *Factores de modificación máximos y mínimos de las propiedades de los dispositivos clase I*, por Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (2020).

Tabla 8

Factores de modificación de las propiedades de los dispositivos de Clase II

Factor de modificación	Interfaz no lubricada	LRB		HDR	
Variable	μ o Q	K_2	Q	K_2	Q
$\lambda_{\text{máx}}$	2.10	1.80	1.80	2.20	1.80
$\lambda_{\text{mín}}$	0.60	0.80	0.80	0.80	0.80

Nota. Adaptado de *Factores de modificación máximos y mínimos de las propiedades de los dispositivos clase II*, por Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (2020)

La Norma E.031 (MVCS, 2020c, p. 23) señala dos maneras que permiten determinar el espectro elástico en edificaciones con aislamiento sísmico: mediante un estudio de sitio o utilizando los parámetros Z, S y U, indicados en la Norma E.030 del MVCS (2020), donde:

$$S_{aM} = 1.5 ZUCSg$$

El parámetro “C” se puede determinar mediante:

$$\begin{array}{ll}
 T < 0.2 T_P & C = 1 + 7.5 \left(\frac{T}{T_P} \right) \\
 0.2 T_P < T < T_P & C = 2.5 \\
 T_P < T < T_L & C = 2.5 \left(\frac{T_P}{T} \right) \\
 T > T_L & C = 2.5 \left(\frac{T_P \cdot T_L}{T^2} \right)
 \end{array}$$

Manual técnico HAZUS-MH MR4

Este manual fue realizado por la Agencia Federal para el Manejo de Emergencias (FEMA) y publicado en el año 2003, el cual describe una metodología que busca estimar y evaluar el riesgo de pérdidas por terremotos.

En el capítulo 5 del manual técnico HAZUS-MH MR4 (FEMA, 2003) se indica que para edificaciones de mediana altura de entre 4 y 7 niveles, conformadas por pórticos resistentes a momentos, las derivas no podrán superar 0.0033. Por otro lado, en el mismo capítulo, el manual técnico HAZUS-MH MR4 (FEMA, 2003) indica que, para el caso de elementos no estructurales, la aceleración de piso no debe exceder de 0.30g. Los límites previamente descritos buscan mantener un leve umbral del estado de daño en la edificación al ser sometida a un terremoto.

Métodos de análisis

El capítulo IV de la Norma E.031 (MVCS, 2020) señala los procedimientos de análisis a desarrollar para estructuras sísmicamente aisladas, descritos a continuación.

Análisis estático o de fuerzas estáticas equivalentes

Este es un método elástico el cual es inicialmente descrito en el artículo 17 de la Norma E.031 (MVCS, 2020), que tiene entre sus requisitos que las edificaciones aisladas no superen los 4 pisos o 20 metros de altura, que estas no presenten las irregularidades indicadas en el artículo 8, que el periodo efectivo de la estructura aislada sea mayor a 3 veces el periodo

efectivo de la misma estructura en base fija, pero no supere los 5 segundos, que el amortiguamiento efectivo sea menor o igual a 30%, que estructuras ubicadas en la zona sísmica 4 deben encontrarse sobre suelos S_1 , entre otras restricciones. Por otro lado, el procedimiento de este análisis es especificado en el capítulo V.

Es importante señalar que este método puede ser usado para predimensionar el sistema de aislamiento, esto como primer paso para el desarrollo de los análisis dinámicos (Moscoso, 2019).

A continuación, se describirán algunos parámetros indicados en la Norma E.031 (2020) necesarios para realizar un análisis estático.

El desplazamiento traslacional (D_M) es calculado en el centro de rigidez del sistema de aislamiento, para los límites superior ($\lambda_{\text{máx}}$) e inferior ($\lambda_{\text{mín}}$) para cada dirección.

$$D_M = \frac{S_{aM} T_M^2}{4\pi^2 B_M}$$

Donde:

- S_{aM} : Ordenada del espectro de diseño.
- T_M : Periodo efectivo de la estructura aislada.
- B_M : Factor de amortiguación, el cual se puede obtener de la tabla 9.

Tabla 9

Factor de amortiguamiento B_M

Amortiguamiento efectivo β_M	Factor B_M
≤ 2	0.8
5	1.0
10	1.2
20	1.5
30	1.7
≥ 40	1.9

Nota. Adaptado de *Factor de amortiguación B_M* , por Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (2020).

El periodo efectivo (T_M) de la estructura aislada, determinado para los límites superior e inferior se puede calcular mediante la siguiente ecuación:

$$T_M = 2\pi \sqrt{\frac{P}{K_M g}}$$

Donde:

- P: Peso de la estructura sobre la interfaz del sistema de aislamiento.
- K_M : Rigidez efectiva del sistema de aislamiento sísmico.
- g: Aceleración de la gravedad.

El desplazamiento total (D_{TM}) del sistema de aislamiento incluye el desplazamiento traslacional y torsional, no puede ser inferior a 1.15 D_M ni a lo calculado por:

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

Donde:

- D_M : Desplazamiento traslacional.
- y: Distancia entre el centro de rigidez del sistema de aislamiento y el elemento de interés.
- e: Excentricidad obtenida de la suma de la distancia entre el centro de masa de la estructura sobre la interfaz de aislamiento y el centro de rigidez del sistema de aislamiento, más la excentricidad accidental.
- b: Dimensión menor en planta.
- d: Dimensión mayor en planta.
- P_T : Razón entre el periodo traslacional efectivo y el periodo rotacional efectivo del sistema de aislamiento, calculado mediante un análisis dinámico o mediante la siguiente fórmula:

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

Donde:

- r_a : Radio de giro del sistema de aislamiento calculado como: $\frac{1}{12}(b^2 + d^2)^{1/2}$
- N : Número de aisladores.
- x_i, y_i : Distancias horizontales en los ejes X e Y entre el centro de masa del sistema de aislamiento y el i-ésimo aislador.

La fuerza cortante que actúa en el sistema de aislamiento, se calcula considerando los límites superiores ($\lambda_{\text{máx}}$) e inferiores ($\lambda_{\text{mín}}$) mediante la siguiente fórmula:

$$V_b = K_M D_M$$

Donde:

- K_M : Rigidez efectiva del sistema de aislamiento.
- D_M : Desplazamiento traslacional.

La fuerza cortante que actúa sobre los elementos estructurales sobre el nivel de base, se determina considerando los límites superiores ($\lambda_{\text{máx}}$) e inferiores ($\lambda_{\text{mín}}$) mediante la siguiente fórmula:

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

Donde:

- R_a : Coeficiente de reducción de fuerzas sísmicas (fue considerado como $R_a = 1$ ya que la estructura evaluada corresponde a una edificación hospitalaria esencial).
- V_{st} : Fuerza cortante no reducida que actúa sobre los elementos estructurales sobre el nivel de base, se determina mediante la siguiente fórmula:

$$V_{st} = V_b \left(\frac{P_s}{P} \right)^{(1-2.5\beta_M)}$$

Donde:

- P: Peso sísmico de la estructura sobre la interfaz de aislamiento.
- P_s : Peso sísmico de la estructura sobre la interfaz de aislamiento sin considerar el nivel de base (losa maciza, vigas, capiteles, entre otros).
- β_M : Amortiguamiento efectivo del sistema de aislamiento sísmico.

Análisis dinámico modal espectral

Este procedimiento es descrito en el artículo 25 de la Norma E.031 (MVCS, 2020), el cual presenta casi los mismos requisitos del análisis estático. El diseño de los elementos de la superestructura puede ser obtenidos por este método.

Este análisis permite obtener las respuestas estructurales de un edificio sometido al SMC, lo que se logra mediante los principales modos participativos (Moscoso, 2019).

Análisis dinámico no lineal tiempo-historia (ANLTH)

Este procedimiento es descrito en el artículo 25 de la Norma E.031 (MVCS, 2020), el cual es permitido en cualquier estructura sísmicamente aislada, a diferencia de los análisis previamente mencionados, que presentan restricciones.

Para este análisis se buscará que los elementos que conformen la estructura aislada presenten un comportamiento elástico, en tanto que los aisladores trabajen en el rango inelástico, con el objetivo de reducir el tiempo y la carga computacional, siendo esto una clara ventaja en comparación con un análisis no lineal total, lo que se puede lograr mediante el uso del Fast Nonlinear Analysis (FNA) que permite el software ETABS (Moscoso, 2019).

Registros de aceleración del suelo

El artículo 15 de la Norma E.031 (MVCS, 2020) menciona que el ANLTH requiere al menos siete pares de registros sísmicos, con las componentes de aceleración Este-Oeste y Norte-Sur, y consistentes con el SMC en magnitud, distancia a las fallas, mecanismos de fuente

y condiciones locales del suelo, motivo por el cual, esta investigación buscará elegir registros que se ajusten lo más posible a estos requerimientos.

Corrección y escalamiento de registros

La corrección por filtrado de frecuencias es un procedimiento que permite limpiar los registros sísmicos de señales no deseadas, como es el caso del ruido ambiental, vibraciones no controladas como el paso vehículos o maquinaria pesada, entre otros. No obstante, otro error frecuente que se encuentra en los registros sísmicos es que presenten desplazamientos del eje cero, para lo cual se usa la corrección por línea base (Melendrez y Pantoja, 2020). Para realizar estos cálculos usó el software SeismoSignal v2025.

La Norma E.031 (MVCS, 2020c, p. 23) indica en el artículo 15 que los registros deberán ser escalados al SMC mediante el escalamiento de amplitudes o el ajuste de frecuencias.

El escalamiento de amplitudes aplica un único factor de escala a todos los valores del acelerograma con la finalidad de calzar con el SMC, preservando así el contenido de frecuencias del registro utilizado. Por otro lado, el ajuste de frecuencias modifica los armónicos del acelerograma, con el propósito de obtener un espectro similar al SMC, de esta manera no se preserva el contenido de frecuencias del registro utilizado (Janampa, 2018). Para realizar estos cálculos usó el software SeismoMatch v2025.

III. MÉTODO

3.1. Tipo de investigación

Según Hernández et al. (2014), una investigación con enfoque cuantitativo tiene como características que el problema puede ser planteado y medido, se puede revisar la literatura y construir el marco teórico, la hipótesis se hace antes de la recolección de datos, la hipótesis puede ser comprobada o refutada, además este tipo de investigación sigue un proceso estructurado.

Por otro lado Hernández et al. (2014) indica que la investigación con alcance explicativo centra su interés en las causas que generan un fenómeno y como este se manifiesta o relaciona con dos o más variables, además menciona que este tipo de investigación es la más estructurada y permite un mayor entendimiento del fenómeno analizado.

Considerando lo anteriormente definido, esta investigación tendría un enfoque cuantitativo ya que el problema puede ser medido mediante sus variables, existe una extensa literatura sobre el tema abordado, la hipótesis ha podido ser planteada previamente a la recolección de datos y esta puede ser refutada o comprobada en función a los resultados que se obtendrán posteriormente, además se sigue una estructura de análisis y diseño.

Por otro lado, esta investigación tendría además un alcance explicativo, ya que esta busca encontrar que efecto genera el uso de tres sistemas de aislamiento en la respuesta estructural de una edificación hospitalaria, buscando entender este fenómeno.

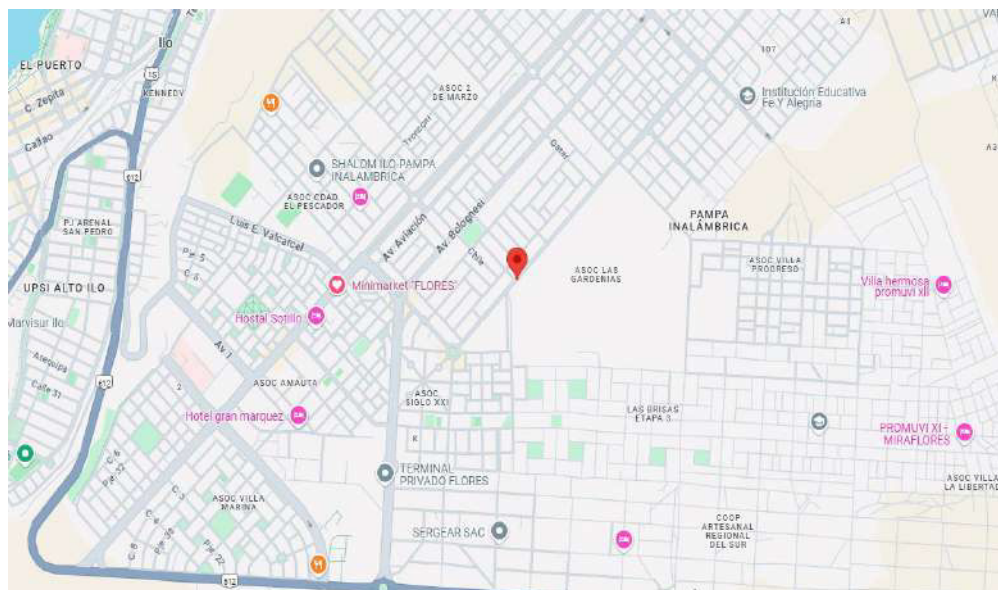
Se pueden inferir que esta investigación es por enfoque de tipo cuantitativa y por alcance de tipo explicativa.

3.2. Ámbito temporal y espacial

La estructura hospitalaria evaluada en esta investigación está proyectada en un terreno propiedad de EsSalud, ubicada en el sector Pampa Inalámbrica de la ciudad de Ilo, provincia de Ilo, departamento de Moquegua, y se ha desarrollado para el año 2025.

Figura 15

Mapa de ubicación de la edificación hospitalaria proyectada

**Figura 16**

Fotografía in situ del terreno propiedad de EsSalud



3.3. Variables

3.3.1 Variable independiente

Tres sistemas de aislamiento sísmico

3.3.2 Variable dependiente

Respuesta estructural de una edificación hospitalaria.

3.4. Población y muestra

3.4.1 Población

Las conclusiones más destacables de una investigación se derivan de la población, que es un conjunto de elementos con objetivos compartidos (Cabezas et al., 2018).

La población la conforma un hospital materno infantil proyectado, sísmicamente aislado. Esta población fue elegida debido a que a la fecha del desarrollo de esta investigación no existen edificaciones hospitalarias con aislamiento sísmico en la ciudad de Ilo.

3.4.2 Muestra

La muestra es una parte del universo total de una población la cual permitirá dar a conocer datos específicos de la misma (Cabezas et al., 2018).

Para esta investigación se utilizó el tipo de muestra no probabilística o dirigida, en el cual las muestras se eligen según las características de la investigación, sin la necesidad de ser estadísticamente representativas de una población (Hernández et al., 2014).

De la población previamente definida se ha seleccionado la muestra, que la conforma el hospital materno infantil proyectado, sísmicamente aislado con tres sistemas de aislamiento: LRB + SL, LRB + HDR + SL y TFP. Esta es una edificación de 5 niveles y 1188.25 m² de área en planta, con una estructura de concreto armado constituido por un sistema aporticado en ambas direcciones, y losas macizas que conforman las losas de entrepiso y la losa del sistema de aislamiento.

3.5. Instrumentos

Para esta investigación se utilizó la técnica de observación directa, en la cual el investigador se pone personalmente en contacto con el fenómeno que está investigando (Cabezas et al., 2018).

El instrumento utilizado será la ficha técnica, en la que se registrarán los resultados obtenidos según los indicadores de la variable dependiente, los cuales son: derivas de entrepiso, aceleraciones de piso, desplazamiento máximo del sistema de aislamiento, fuerza cortante en la base de la superestructura aislada y fuerza cortante en el sistema de aislamiento sísmico, que deberán ser válidos y confiables.

- Ficha N°1: Corresponde al indicador derivas de entrepiso (véase Anexo E).
- Ficha N°2: Corresponde al indicador aceleraciones de piso (véase Anexo E).
- Ficha N°3: Corresponde al indicador desplazamiento total máximo del sistema de aislamiento (véase Anexo E).
- Ficha N°4: Corresponde al indicador fuerza cortante en la base de la superestructura aislada (véase Anexo E).
- Ficha N°5: Corresponde al indicador fuerza cortante en el sistema de aislamiento (véase Anexo E).

La validez indica el grado en el que un instrumento mide realmente la variable que pretende medir (Hernández et al., 2014), se estimará mediante el uso del juicio de expertos, que consiste en la opinión de personas con trayectoria y experiencia en el tema de estudio, que pueden dar juicios y valoraciones sobre este (Escobar y Cuervo, 2008).

- Experto N°1: Deberá indicar el nombre, código CIP y la calificación en la ficha correspondiente (véase Anexo E).
- Experto N°2: Deberá indicar el nombre, código CIP y la calificación en la ficha correspondiente (véase Anexo E).

- Experto N°3: Deberá indicar el nombre, código CIP y la calificación en la ficha correspondiente (véase Anexo E).

El grado en que los resultados hallados son similares y coherentes cuando se aplican repetidamente al mismo tema de investigación se conoce como fiabilidad de los resultados (Hernández et al., 2014), que se conseguirá mediante el uso de softwares con licencia, educativos o de uso libre (véase Anexo F).

3.6. Procedimientos

El procedimiento para el diseño de sistemas de aislamiento es iterativo, presentando varias etapas. En la etapa 1 se obtuvo el diseño arquitectónico de la edificación hospitalaria; en la etapa 2 se realizó el diseño preliminar de los sistemas de aislamiento, usando análisis estático y considerando propiedades nominales; en la etapa 3 se realizó el análisis dinámico modal espectral, considerando propiedades de límite inferior y límite superior; en la etapa 4 se realizó el ANLTH, considerando propiedades nominales, de límite superior e inferior, donde se verificaron las respuestas estructurales de la edificación. El procedimiento realizado se muestra mediante los siguientes diagramas de flujo.

Figura 17

Diagrama de flujo, etapa 1 a 2

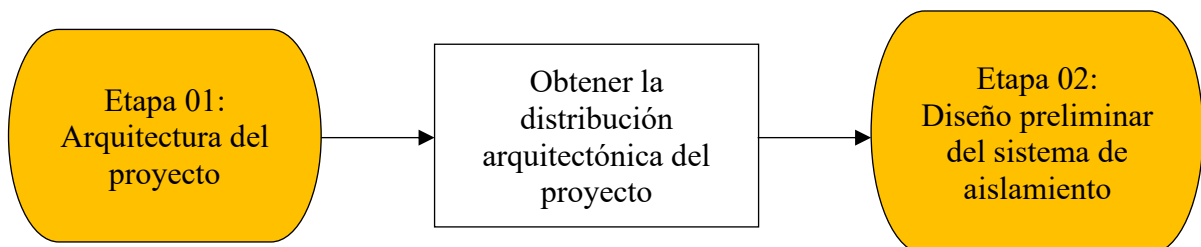


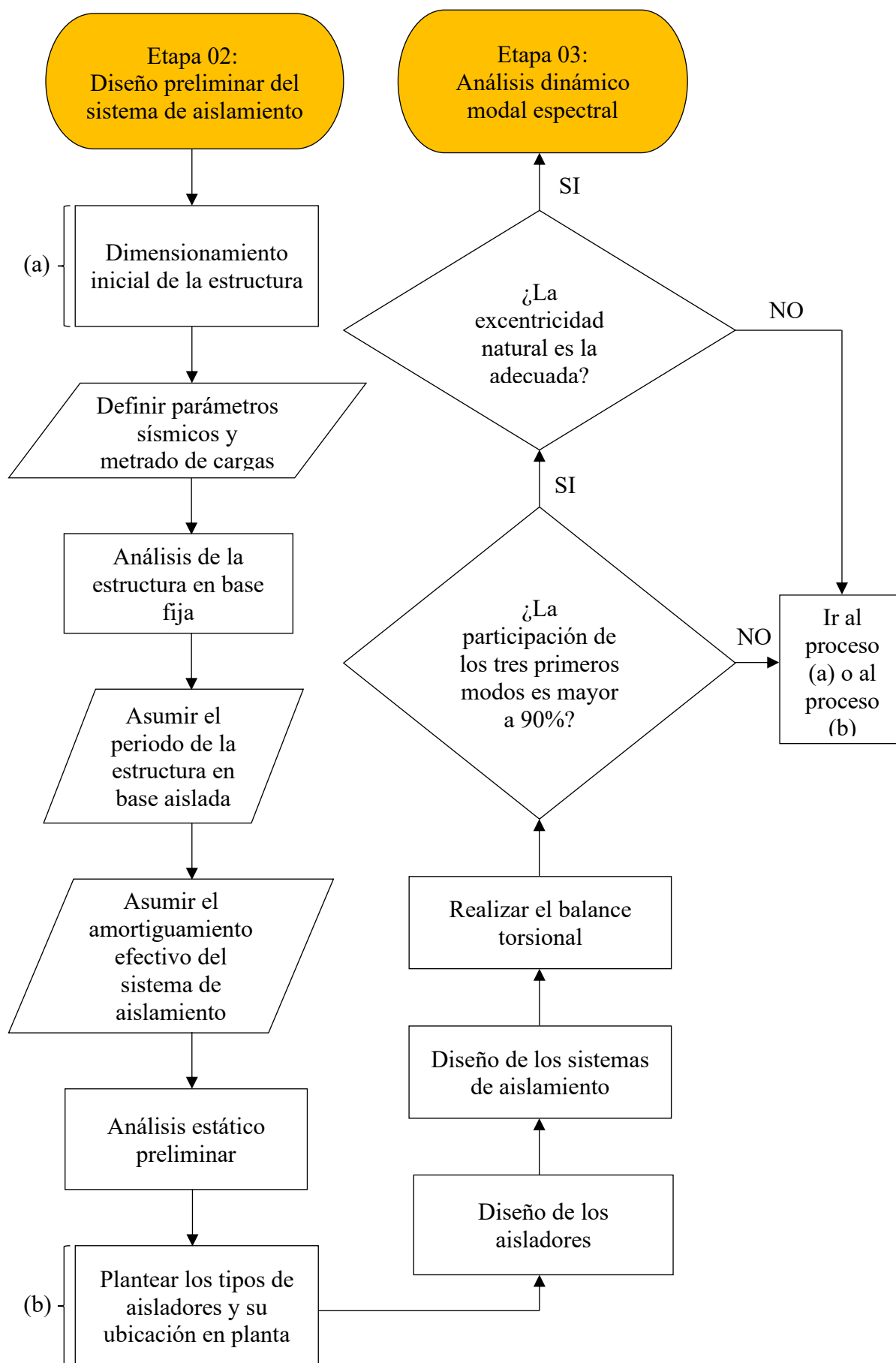
Figura 18*Diagrama de flujo, etapa 2 a 3*

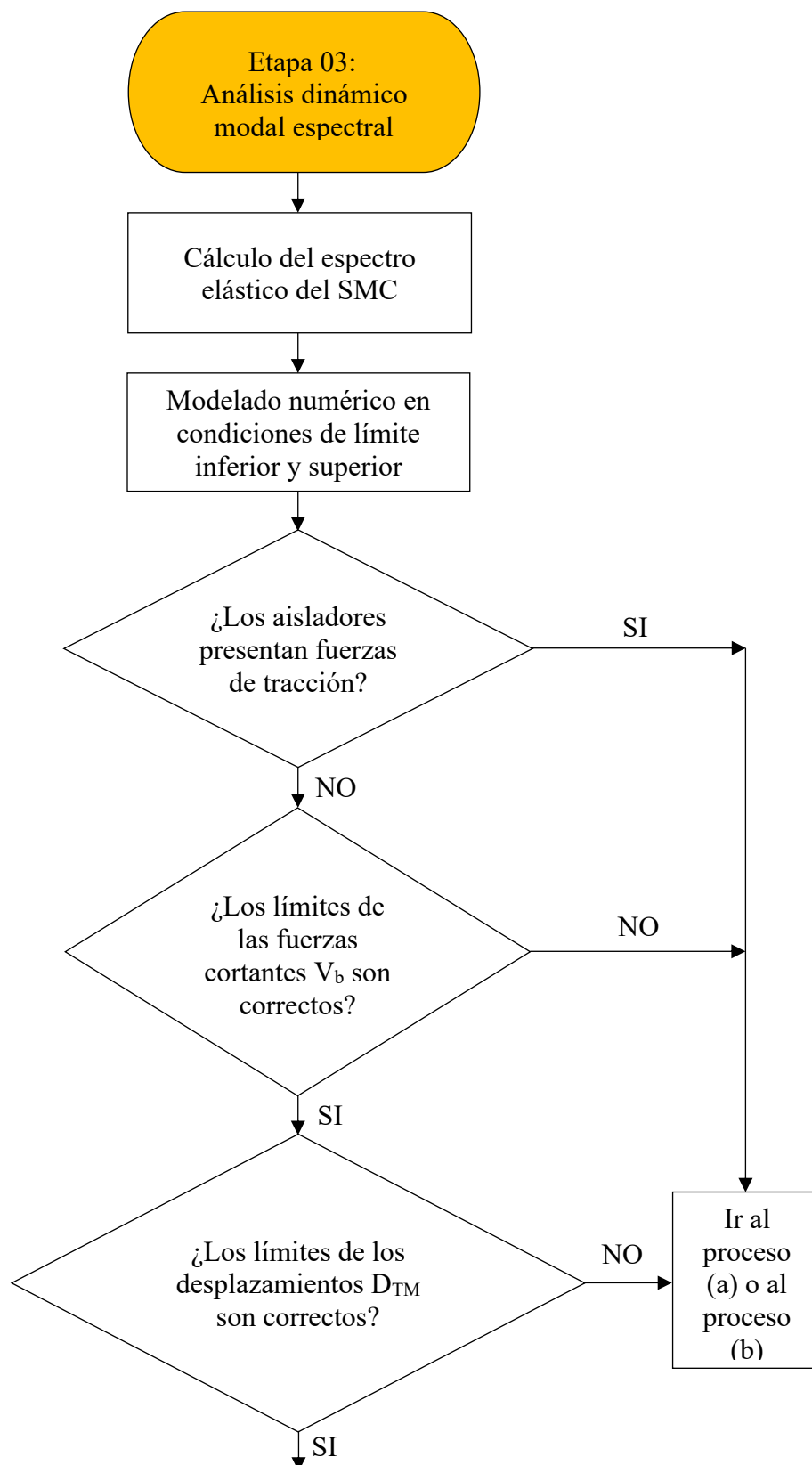
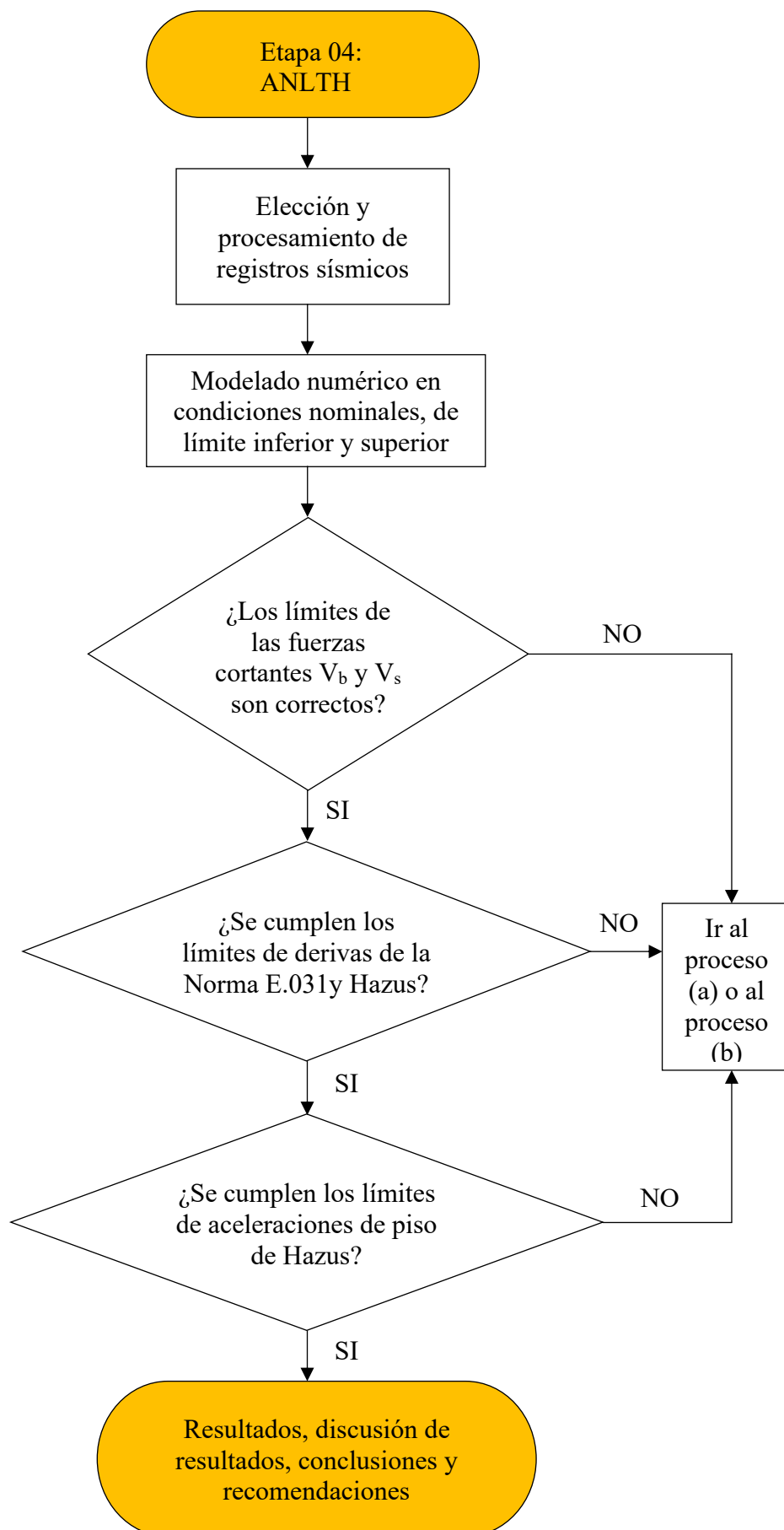
Figura 19*Diagrama de flujo, etapa 3 a 4*

Figura 20*Diagrama de flujo, etapa 4*

Etapas 01: Arquitectura del proyecto

3.6.1.1. Distribución arquitectónica del proyecto. La arquitectura de la edificación hospitalaria evaluada en esta tesis fue realizada por un profesional capacitado y habilitado por el Colegio de Arquitectos del Perú (véase Anexo G), con el objetivo de cumplir los requerimientos arquitectónicos propios de este tipo de edificación.

Figura 21

Elevación frontal del hospital materno infantil

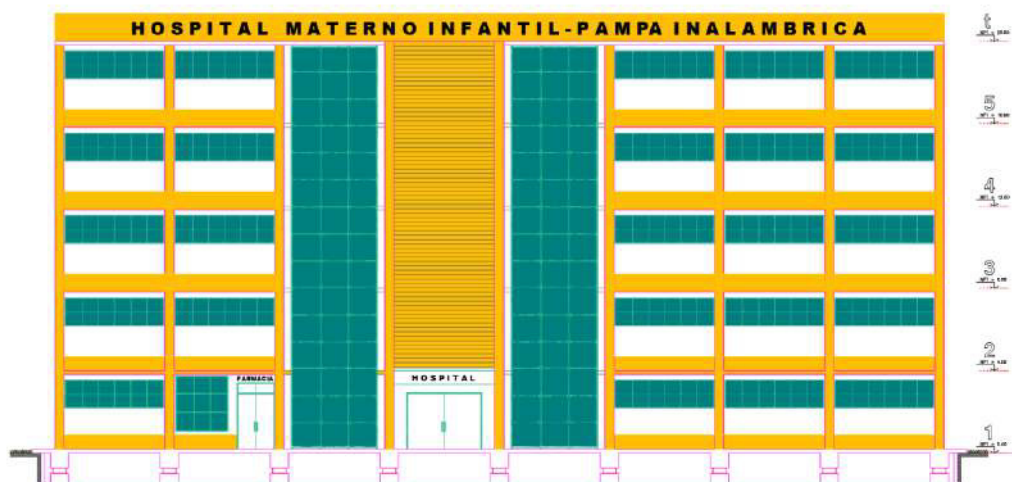


Figura 22

Planta del primer nivel de la edificación

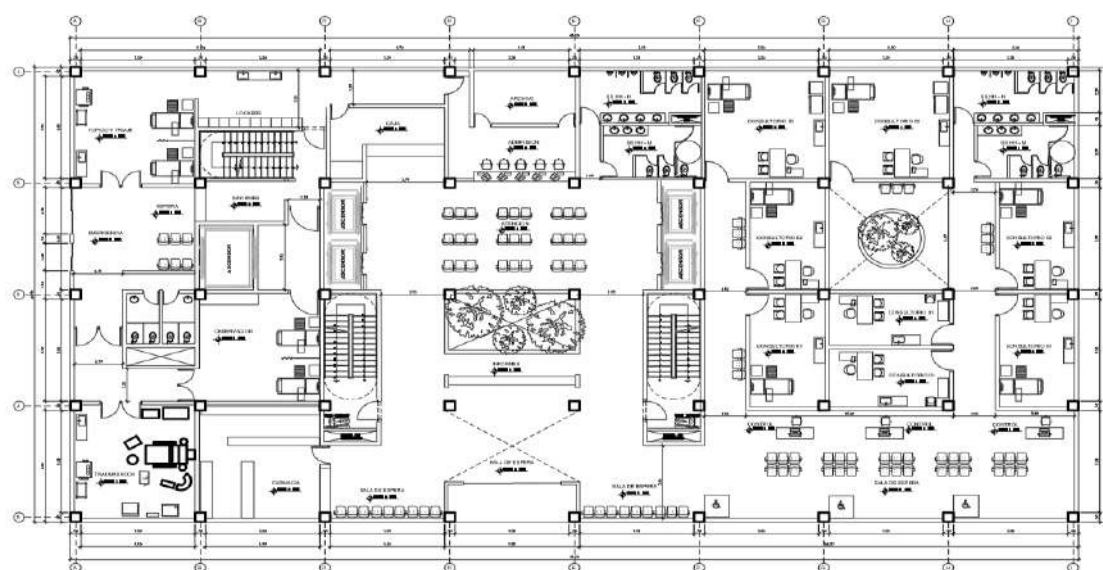


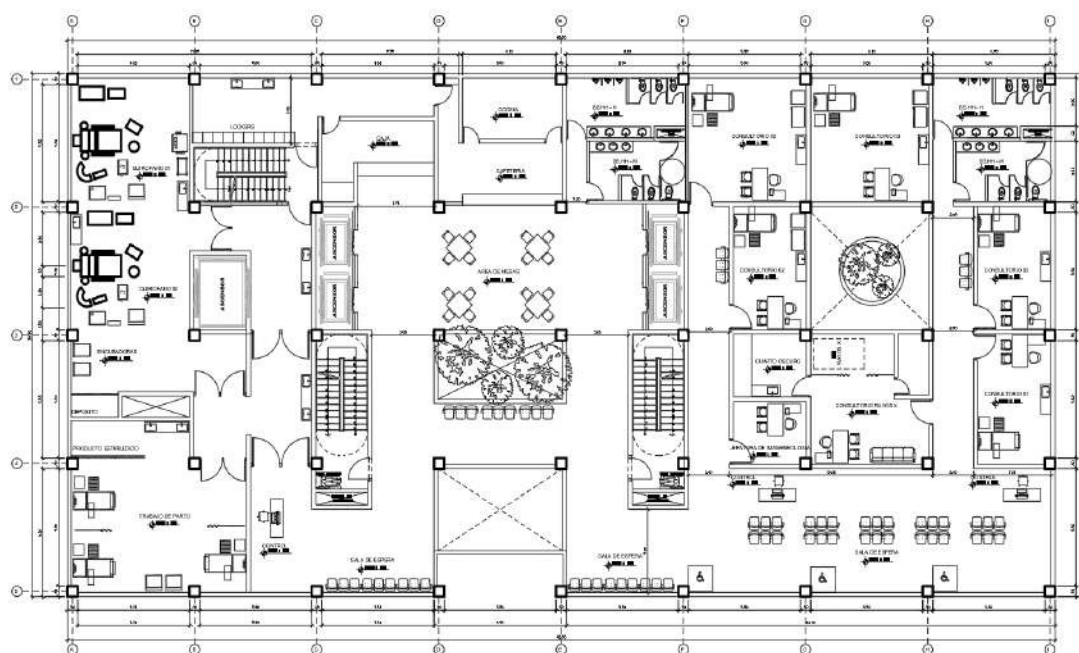
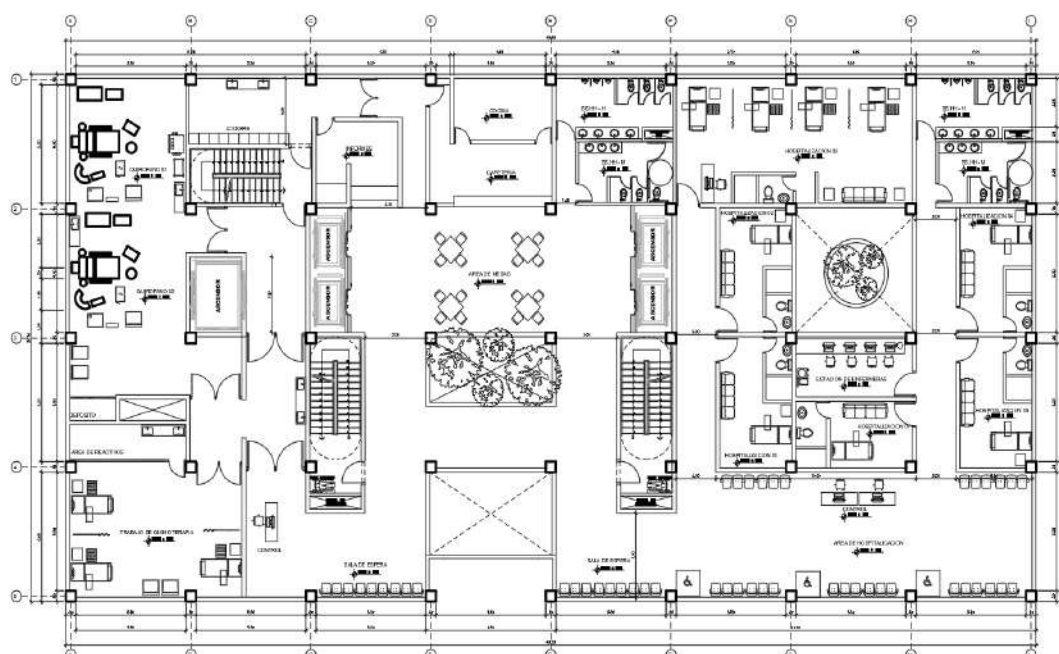
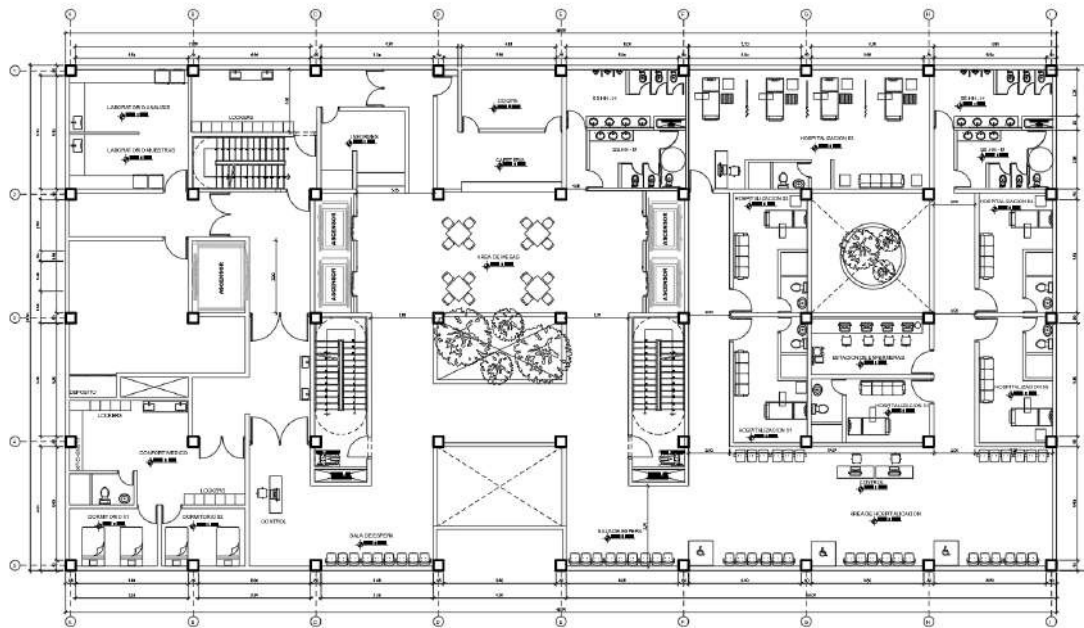
Figura 23*Planta del segundo nivel de la edificación***Figura 24***Planta del tercer nivel de la edificación*

Figura 25*Planta típica de la edificación*

El hospital materno infantil usado en el presente estudio contó con 5 niveles, cada uno con una altura típica de 4.00 m, una planta de forma rectangular con un área de 1188.25 m² con dimensiones de 48.50 m y 24.50 m en cada lado, y luces de aproximadamente 6.00 m entre los pórticos.

Etapas 02: Diseño preliminar del sistema de aislamiento

3.6.2.1. Dimensionamiento inicial de la estructura. La superestructura presentó una configuración regular, compuesta por concreto armado con una resistencia de $f'_c=280 \text{ kgf/cm}^2$, conformada por pórticos en ambas direcciones y losas macizas en todos los niveles incluyendo el sistema de aislamiento, con un ratio de esbeltez (razón entre la altura de la edificación y un lado del área en planta) de 0.82.

A. Losa maciza. Tanto el sistema de techado como el sistema de aislamiento estuvieron conformados por losas macizas en dos direcciones. Blanco (1994) menciona que este tipo de elementos estructurales presentan una buena resistencia, rigidez, aislamiento acústico y control

de vibraciones. Por otro lado, este autor indica también que el espesor de una losa maciza podría ser de 0.20 m para luces menores a 6.50 m, o siguiendo las siguientes formulas:

$$h = \frac{\text{Perímetro}}{180} = \frac{6 \times 4}{180} = 0.133 \text{ m}$$

$$h = \frac{\text{Luz}}{40} = \frac{6}{40} = 0.150 \text{ m}$$

De estos resultados, inicialmente se optó por un espesor de losa maciza de 0.20 m, sin embargo, a lo largo de la investigación se determinó que el espesor más adecuado era de 0.25 m, aplicándose tanto a las losas de techo como a la losa del sistema de aislamiento.

B. Vigas de la superestructura. Las vigas ubicadas sobre el sistema de aislamiento fueron predimensionadas tal como lo indicó Blanco (1994), por lo que se consideró un espesor de 0.30 m y un peralte definido por la siguiente fórmula:

$$h = \frac{\text{Luz}}{10} = \frac{6}{10} = 0.60 \text{ m}$$

De estos resultados, inicialmente se optó por vigas con dimensiones de 0.30 x 0.60 m² de sección transversal, sin embargo, a lo largo de la investigación se determinó que las vigas ubicadas en las esquinas de la edificación tendrían dimensiones de 0.30 x 0.70 m² con el objetivo de disminuir efectos de levantamiento local por fuerzas de tracción en los dispositivos de aislamiento, mientras que el resto de vigas tendrían dimensiones de 0.30 x 0.80 m².

C. Columnas de la superestructura. El predimensionado de columnas fue realizado según lo indicado por Blanco (1994), donde:

$$\text{Área de la columna} = \frac{P_{\text{servicio}}}{0.35f'_c}$$

La carga de servicio (P_{servicio}) se determinó mediante la siguiente ecuación:

$$P_{\text{servicio}} = P_{\text{sísmico}} \times A_{\text{tributaria}} \times N_{\text{pisos}}$$

$$P_{\text{servicio}} = 1.05 \frac{\text{tonf}}{\text{m}^2} \times (6 \times 6 \text{ m}^2) \times 5 = 189 \text{ tonf}$$

Por lo cual se obtuvo:

$$\text{Área de la columna} = \frac{P_{servicio}}{0.35f'_c} = \frac{189 \text{ tonf}}{0.35 \times 2800 \frac{\text{tonf}}{\text{m}^2}} = 0.193 \text{ m}^2$$

Por lo que el lado de una columna de sección cuadrada se calculó como:

$$\text{Lado de columna} = \sqrt{0.193 \text{ m}^2} = 0.44 \text{ m} \approx 0.50 \text{ m}$$

De estos resultados, inicialmente se optó por columnas con dimensiones de 0.50 x 0.50 m² de sección transversal, sin embargo, a lo largo de la investigación se determinó que las dimensiones de 0.80 x 0.80 m² eran las más adecuadas.

D. Vigas del sistema de aislamiento. Estas vigas están sometidas a mayores demandas por momentos de segundo orden (efecto P-Δ), motivo por el cual fueron consideradas dimensiones mayores respecto a las otras vigas, optándose inicialmente por dimensiones de 0.40 x 0.70 m² de sección transversal, sin embargo, a lo largo de la investigación se determinó que las dimensiones de 0.40 x 0.90 m² eran las más adecuadas.

3.6.2.2. Definición de los parámetros sísmicos. Los factores Z, S y U se definieron conforme a la Norma E.030 (MVCS, 2020b). La edificación al estar ubicada en la ciudad de Ilo, en Moquegua, le correspondió el factor de zona Z₄=0.45. Por otro lado, se consideró un suelo rígido, tomando como referencia la investigación de Aguilar (2020), realizada en inmediaciones cercanas a la ubicación de la edificación hospitalaria proyectada en esta investigación, por lo cual el factor de suelo fue de S₁=1.00. El factor de uso correspondiente fue de U=1.00. El coeficiente de reducción de fuerzas sísmicas indicado en la Norma E.031 del (MVCS, 2020) fue de R_a=1.00, considerado así al tratarse de una edificación esencial.

3.6.2.3. Cálculo del metrado de cargas. La Norma E.020 (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento [MVCS], 2020) indica los valores mínimos de cargas vivas que actúan sobre la edificación. Las cargas muertas se obtuvieron de metrados.

Tabla 10*Cargas vivas repartidas*

Sobrecarga	Cargas
Sala de operaciones, laboratorios y zonas de servicio	300 kgf/m ²
Corredores	400 kgf/m ²
Escaleras	400 kgf/m ²
Azotea	100 kgf/m ²

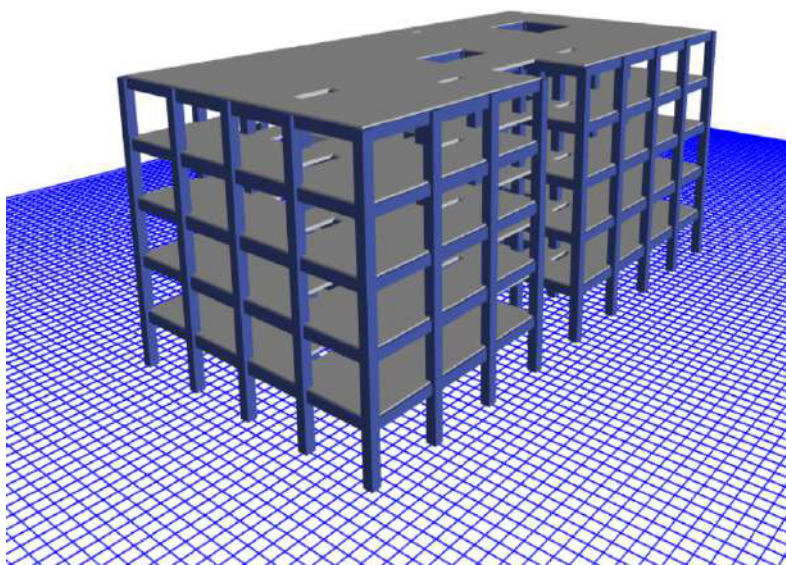
Tabla 11*Cargas muertas repartidas*

Peso propio	Cargas
Piso terminado	100 kgf/m ²
Tuberías contra incendio, ductos de ventilación y falso techo	50 kgf/m ²
Ascensores	300 kgf/m ²
Tabiquería	150 kgf/m ²

3.6.2.4. Análisis de la estructura en base fija. El modelamiento numérico fue realizado en ETABS versión 22.5.0. Las vigas y columnas fueron modeladas como elementos tipo frame, por otro lado, las losas macizas fueron modeladas como elementos tipo shell-thin.

Se asignaron brazos rígidos en los elementos tipo frame mediante la opción end length offsets, y en los extremos de las vigas donde no se pudo anclar correctamente el acero de refuerzo se usó la opción releases.

Las losas fueron consideradas como diafragmas rígidos en todos los niveles y les fueron asignadas las cargas muertas y vivas correspondientes.

Figura 26*Modelo numérico de la estructura en base fija***Tabla 12***Participación modal de masas en la estructura de base fija*

Modo	Periodo (seg)	UX	UY	RZ	Sum UX	Sum UY	Sum RZ
1	0.55	24.03%	43.29%	14.51%	24.03%	43.29%	14.51%
2	0.54	51.37%	30.41%	0.10%	75.40%	73.70%	14.60%
3	0.52	6.57%	8.03%	67.13%	81.97%	81.73%	81.73%
4	0.17	1.07%	9.43%	0.32%	83.04%	91.16%	82.05%
5	0.17	9.25%	1.25%	0.22%	92.30%	92.41%	82.27%
6	0.16	0.37%	0.14%	10.30%	92.66%	92.55%	92.57%
7	0.09	0.08%	4.32%	0.00%	92.74%	96.87%	92.57%
8	0.09	4.24%	0.08%	0.03%	96.98%	96.95%	92.60%
9	0.09	0.03%	0.00%	4.39%	97.01%	96.96%	96.99%
10	0.08	0.00%	0.00%	0.00%	97.01%	96.96%	96.99%
11	0.08	0.00%	0.00%	0.00%	97.01%	96.96%	96.99%
12	0.08	0.00%	0.00%	0.00%	97.01%	96.96%	96.99%
13	0.08	0.00%	0.00%	0.00%	97.01%	96.96%	96.99%
14	0.07	0.00%	0.00%	0.00%	97.01%	96.96%	96.99%
15	0.07	0.00%	0.00%	0.00%	97.01%	96.96%	96.99%

En la tabla 12 se observa que el primer modo es el que tiene el mayor periodo con 0.55 segundos, siendo este el periodo fundamental, el segundo y tercer modo presentaron periodos de 0.54 y 0.52 segundos respectivamente. Sin embargo, es claro que la estructura presenta un problema de torsión, el cual fue corregido al utilizar sistemas de aislamiento sísmico.

$$T_{Base\ fija} = 0.55\ s$$

Se determinó un valor inicial del peso de la superestructura sin considerar el nivel de base (P_s). Este parámetro fue calculado directamente para la estructura en base fija.

$$P_s = 7553.97\ tonf$$

Se determinó un valor inicial del peso de la superestructura considerando el nivel de base (P), adicionando a P_s el peso del primer nivel como una primera iteración de los cálculos.

$$P = 9124.49\ tonf$$

3.6.2.5. Análisis estático preliminar. Se estimó el valor para el periodo de la estructura sísmicamente aislada, el cual fue como mínimo el triple del obtenido para la estructura en base fija.

$$T_{Base\ aislada} \geq 3\ T_{Base\ fija}$$

Con los parámetros previamente calculados se pudo determinar el valor preliminar de la rigidez efectiva del sistema de aislamiento (K_M) mediante la fórmula indicada en el artículo 20 de la Norma E.031 (MVCS, 2020):

$$T_{Base\ aislada} = T_M = 2\pi \sqrt{\frac{P}{K_M \cdot g}}$$

$$g = 9.81\ m/s^2$$

Para obtener el valor de la rigidez efectiva preliminar de cada aislador (K_{eff}) se dividió el valor de K_M entre el número de aisladores (45 dispositivos).

El desplazamiento traslacional (D_M) y el desplazamiento total máximo (D_{TM}) del sistema de aislamiento se determinaron mediante las fórmulas indicadas en el artículo 20 de la Norma E.031 (MVCS, 2020):

$$D_M = \frac{S_{aM} T_M^2}{4\pi^2 B_M}$$

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

Donde el factor de amortiguamiento B_M depende directamente del amortiguamiento efectivo del sistema de aislamiento (β_M), el cual es un parámetro que se fue iterando hasta encontrar los resultados más óptimos.

Tabla 13

Parámetros preliminares del análisis estático

Parámetro	Sistema de aislamiento			Unidad
	LRB+SL	LRB+HDR+SL	TFP	
Periodo en base fija ($T_{Base\ fija}$)	0.55	0.55	0.55	s
Periodo en base aislada ($T_{Base\ aislada}$)	3.18	3.26	3.16	s
Peso de la estructura considerando el nivel de base (P)	9124.49	9124.49	9124.49	tonf
Peso de la estructura sin considerar el nivel de base (P_s)	7553.97	7553.97	7553.97	tonf
Rigidez efectiva del sistema de aislamiento (K_M)	3622.31	3453.86	3672.71	tonf/m
Rigidez efectiva de cada aislador (K_{eff})	80.5	76.75	81.62	tonf/m
Desplazamiento traslacional (D_M)	0.272	0.267	0.269	m
Desplazamiento total máximo (D_{TM})	0.327	0.321	0.323	m

3.6.2.6. Procedimientos para el diseño de los aisladores. El diseño de los dispositivos de aislamiento consistió de un procedimiento iterativo, en el cual se probaron aisladores de diferentes dimensiones y propiedades mecánicas hasta obtener el resultado más óptimo.

A. Procedimiento para el diseño de aislador LRB. La rigidez efectiva de un LRB fue determinada mediante lo indicado en Bridgestone (2022).

$$K_{eff} = \frac{Q}{\gamma \cdot H} + K_2$$

Donde:

- Q: Fuerza característica o de activación.
- K₂: Rigidez post-fluencia.
- γ : Deformación por corte.
- H: Altura total de la goma.

La deformación por corte (γ) se calculó mediante la siguiente fórmula:

$$\gamma = D_M / H$$

Donde:

- D_M: Desplazamiento traslacional.

La fuerza característica o de activación (Q) se calculó mediante la siguiente fórmula:

$$Q = C_{Qd} \cdot \sigma_{pb} \cdot A_p$$

Donde:

- C_{Qd}: Factor de corrección de resistencia característica debido a la dependencia de la deformación.
- σ_{pb} : Esfuerzo de corte en fluencia del plomo.
- A_p: Área efectiva del núcleo del plomo.

El factor de corrección de resistencia característica debido a la dependencia de la deformación (C_{Qd}) se calculó mediante la siguiente fórmula:

$$C_{Qd} \begin{cases} 2.036\gamma^{0.41} [\gamma \leq 0.1] \\ 1.106\gamma^{0.145} [0.1 < \gamma < 0.5] \\ 1 [0.5 \leq \gamma] \end{cases}$$

La rigidez post-fluencia (K_2) se calculó mediante la siguiente fórmula:

$$K_2 = C_{Kd} \cdot (K_r + K_p)$$

Donde:

- C_{Kd} : Factor de corrección de la rigidez post-fluencia debido a la dependencia de la deformación.
- K_r : Rigidez al corte de la goma laminada.
- K_p : Rigidez adicional al corte debido al plomo.

El factor de corrección de la rigidez post-fluencia debido a la dependencia de la deformación (C_{Kd}) se calculó mediante la siguiente fórmula:

$$C_{Kd} \begin{cases} 0.779\gamma^{-0.43} [\gamma < 0.25] \\ \gamma^{-0.25} [0.25 \leq \gamma < 1.0] \\ \gamma^{-0.12} [1.0 \leq \gamma < 2.5] \end{cases}$$

La rigidez al corte de la goma laminada (K_r) se calculó mediante la siguiente fórmula:

$$K_r = G_r \cdot A_r / H$$

Donde:

- G_r : Módulo de corte de la goma.
- A_r : Área efectiva en el plano del aislador.

La rigidez adicional al corte debido al plomo (K_p) se calculó mediante la siguiente fórmula:

$$K_p = \alpha_p \cdot A_p / H$$

Donde:

- α_p : Módulo de corte aparente del plomo.
- A_p : Área efectiva del núcleo de plomo.

El amortiguamiento efectivo del dispositivo LRB (β_{LRB}) se calculó mediante la siguiente fórmula:

$$\beta_{LRB} = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{Q \left\{ \gamma \cdot H - \frac{Q}{(\varepsilon - 1)K_2} \right\}}{K_{eff}(\gamma \cdot H)^2}$$

Donde:

- ε : Ratio entre rigidez inicial y rigidez post-fluencia.

La rigidez elástica (K_1) se calculó mediante la siguiente fórmula:

$$K_1 = \varepsilon K_2$$

Para el caso de las propiedades de compresión del dispositivo LRB, Bridgestone (2022) indica que la rigidez a la compresión (K_v) se puede calcular mediante la siguiente fórmula:

$$K_v = \alpha_v \cdot E_c \cdot \frac{A}{H}$$

Donde:

- α_v : Factor de corrección al módulo de Young.
- E_c : Módulo de compresión efectiva de la goma.
- A : Área plana de la goma laminada.

El área plana de la goma laminada (A) se calculó mediante la siguiente fórmula:

$$A = A_r + A_p$$

El módulo de compresión efectiva de la goma (E_c) se calculó mediante la siguiente fórmula:

$$E_c = \frac{E(1 + 2kS_1^2)}{\frac{1 + E(1 + 2kS_1^2)}{E_\infty}}$$

Donde:

- E: Módulo de Young de la goma.
- E_{∞} : Módulo volumétrico de la goma.
- k: Factor de corrección del módulo de Young aparente según la dureza.
- S_1 : Primer factor de forma.

El primer factor de forma (S_1) se calculó mediante la siguiente fórmula:

$$S_1 = \frac{D_0}{4t_r}$$

Donde:

- D_0 : Diámetro del aislador LRB.
- t_r : Espesor de una capa de goma.

Adicionalmente se usaron las fórmulas obtenidas del modelo bilineal de aisladores elastoméricos indicadas en 2.2.1.

$$D_y = \frac{Q}{K_1 - K_2}$$

$$F_y = Q + K_2 D_y$$

$$F_M = Q + K_2 D_M$$

$$E_d = 4Q(D_M - D_y)$$

$$E_s = 0.5K_{eff}D_M^2$$

La fuerza de restitución (F_R) del dispositivo LRB se calculó según la siguiente fórmula:

$$F_R = F_{M(D_M)} - F_{M(0.5D_M)}$$

Donde:

- $F_{M(D_M)}$: Fuerza al 100% del desplazamiento traslacional.
- $F_{M(0.5D_M)}$: Fuerza al 50% del desplazamiento traslacional.

La fuerza al 50% del desplazamiento traslacional ($F_{M(0.5D_M)}$) se calculó según la geometría del modelo bilineal para aisladores elastoméricos con la siguiente fórmula:

$$F_{M(0.5D_M)} = F_y + K_2(0.5D_M - D_y)$$

La Norma E.031 (MVCS, 2020c, p. 15) indica en el artículo 9 que la fuerza de restitución debe ser por lo menos 2.5% veces el peso de la estructura considerando el nivel de base.

$$F_R \geq 2.5\%P$$

Se determinó el área reducida (A_R) del aislador LRB mediante la fórmula indicada en el anexo II de la Norma E.031 (MVCS, 2020c, p. 45).

$$A_R = \frac{2A \left[D_0^2 \text{Sen}^{-1} \left(\frac{\sqrt{D_0^2 - D_{TM}^2}}{D_0} \right) - D_{TM} \sqrt{D_0^2 - D_{TM}^2} \right]}{\pi D_0^2}$$

Se determinó la capacidad de carga de pandeo ($P_{crítico}$) del aislador LRB mediante la fórmula indicada en el anexo II de la Norma E.031 (MVCS, 2020c).

$$P_{crítico} = \frac{\pi}{\sqrt{8}} G_r S \frac{D_0}{H} A_R$$

Donde:

- G_r : Módulo de corte de la goma.
- S : Factor de forma.
- D_0 : Diámetro del aislador LRB.
- H : Altura total de la goma.
- A_R : Área reducida.

El factor de forma (S) se calculó mediante la siguiente fórmula:

$$S = \frac{A_r}{\pi D_0 H}$$

Donde:

- A_r : Área efectiva en el plano del aislador.

A continuación, se muestra una serie de verificaciones indicadas en el anexo II de la Norma E.031 (MVCS, 2020) para dispositivos elastoméricos.

Se realizó la verificación del factor de seguridad para carga axial:

$$FS = 3 \leq \frac{P_{critico}}{P_{serv}}$$

Donde:

- P_{serv} : Carga sobre el dispositivo generada por la combinación de carga vertical promedio.

Se realizó la verificación del factor de seguridad para carga última:

$$FS = 1 \leq \frac{P_{critico}}{P_{ultimo}}$$

Donde:

- P_{ultimo} : Carga sobre el dispositivo generada por la combinación de carga vertical máxima.

Se realizó la verificación por deformación por corte debido a la deformación mediante la siguiente fórmula:

$$\lambda_D = \frac{D_{TM}}{H} \leq 2.5$$

Se realizó la verificación por deformación por corte debido a la compresión mediante la siguiente fórmula:

$$\lambda_C = \frac{6 P_{serv} S}{E_c A_R}$$

Se realizó la verificación por deformación por corte debido a la deformación angular mediante la siguiente fórmula:

$$\lambda_\theta = \frac{0.375 D_0^2 \theta}{t_r H}$$

Donde:

- D_0 : Diámetro del aislador LRB.
- t_r : Espesor de una capa de goma.
- H : Altura total de la goma.
- $\Theta \geq 0.003$ en radianes.

Se realizó la verificación por deformación total por corte mediante la siguiente fórmula:

$$\lambda_D + \lambda_C + 0.5\lambda_\Theta \leq 6$$

B. Procedimiento para el diseño de aislador HDR. La rigidez efectiva de un HDR fue determinada mediante lo indicado en Bridgestone (2022).

$$K_{eff} = \frac{G_{eq} \cdot A}{H}$$

Donde:

- G_{eq} : Módulo de corte equivalente de la goma.
- A : Área efectiva del plano del aislador.
- H : Altura total de la goma.

El catálogo de Bridgestone (2022) indica que el módulo de corte equivalente de la goma (G_{eq}) es un parámetro que depende del material. En esta investigación se utilizó el material denominado X0.4S, al cual le corresponde la siguiente fórmula:

$$G_{eq(\gamma)} = 0.054\gamma^4 - 0.416\gamma^3 + 1.192\gamma^2 - 1.583\gamma + 1.145$$

Donde:

- γ : Deformación por corte.

La deformación por corte (γ) se calculó mediante la siguiente fórmula:

$$\gamma = D_M/H$$

La rigidez post-fluencia (K_2) se calculó mediante la siguiente fórmula:

$$K_2 = K_{eff}(1 - u_{(\gamma)})$$

Donde:

- $u_{(\gamma)}$: Función que proporciona la relación entre la resistencia característica y la fuerza cortante máxima en un ciclo histerético.

La función que proporciona la relación entre la resistencia característica y la fuerza cortante máxima de un ciclo histerético ($u_{(\gamma)}$) depende del material. En esta investigación se utilizó el material denominado X0.4S, al cual le corresponde la siguiente fórmula:

$$u_{(\gamma)} = -0.0132\gamma^3 + 0.0401\gamma^2 - 0.0190\gamma + 0.4001$$

La rigidez elástica (K_1) se calculó mediante la siguiente fórmula:

$$K_1 = 10K_2$$

La fuerza característica o de activación (Q) se calculó mediante la siguiente fórmula:

$$Q = u_{(\gamma)}K_{eff}H\gamma$$

El amortiguamiento efectivo del dispositivo HDR (β_{HDR}) depende del material. En esta investigación se utilizó el material denominado X0.4S, al cual le corresponde la siguiente fórmula:

$$\beta_{HDR} = -0.007\gamma^3 + 0.020\gamma^2 - 0.009\gamma + 0.236$$

Para el caso de las propiedades de compresión del dispositivo HDR, Bridgestone (2022) indica que la rigidez a la compresión (K_v) se puede calcular mediante la siguiente fórmula:

$$K_v = E_c \frac{A}{H}$$

- A: Área efectiva del plano del aislador.
- H: Altura total de la goma.
- E_c : Módulo de compresión efectiva de la goma.

El módulo de compresión efectiva de la goma (E_c) se calculó mediante la siguiente fórmula:

$$E_c = \frac{E(1 + 2kS_1^2)}{\frac{1 + E(1 + 2kS_1^2)}{E_\infty}}$$

Donde:

- E: Módulo de Young de la goma.
- E_∞ : Módulo volumétrico de la goma.
- k: Factor de corrección del módulo de Young aparente según la dureza.
- S_1 : Primer factor de forma.

El primer factor de forma (S_1) se calculó mediante la siguiente fórmula:

$$S_1 = \frac{D_0^2 - n_i D_i^2}{4t_r(D_0 + n_i D_i)}$$

Donde:

- D_0 : Diámetro externo del dispositivo HDR.
- D_i : Diámetro interno del dispositivo HDR.
- n_i : Número de diámetro interior.
- t_r : Espesor de una capa de goma.

Adicionalmente se usaron las fórmulas obtenidas del modelo bilineal de aisladores elastoméricos indicadas en 2.2.1.

El cálculo de la fuerza de restitución (F_R) del dispositivo HDR se realizó siguiendo los mismos pasos que para el dispositivo LRB.

El cálculo del área reducida (A_R) del dispositivo HDR se realizó siguiendo los mismos pasos que para el dispositivo LRB.

El cálculo de la capacidad de carga de pandeo ($P_{\text{crítico}}$) del dispositivo HDR se realizó siguiendo los mismos pasos que para el dispositivo LRB.

Las verificaciones de los factores de seguridad para carga axial y carga última del dispositivo HDR se realizaron siguiendo los mismos pasos que para el dispositivo LRB.

Las verificaciones por deformación por corte debido a la deformación, compresión, deformación angular y total se realizaron siguiendo los mismos pasos que para el dispositivo LRB.

C. Procedimiento para el diseño de aislador SL. La rigidez efectiva de un SL se determinó mediante el modelo bilineal mostrado en 2.2.3.

$$K_{eff} = \frac{F_M}{D_M}$$

Donde:

- D_M : Desplazamiento máximo traslacional.
- F_M : Fuerza máxima.

La fuerza máxima (F_M) del dispositivo fue determinada mediante la siguiente fórmula:

$$F_M = \mu \cdot P_{serv}$$

Donde:

- μ : Coeficiente de fricción.
- P_{serv} : Carga sobre el dispositivo generada por la combinación de carga vertical promedio.

Del modelo bilineal se consideró que la fuerza máxima (F_M), la fuerza de fluencia (F_y) y la fuerza característica o de activación (Q) son iguales.

$$F_M = F_y = Q$$

La energía disipada en un ciclo de histéresis (E_d) por el dispositivo SL se determinó mediante la siguiente fórmula:

$$E_d = 4F_M D_M$$

La energía de deformación máxima elástica (E_s) del dispositivo SL se determinó mediante la siguiente fórmula:

$$E_s = 0.5F_M D_M$$

El amortiguamiento efectivo del dispositivo SL (β_{SL}) se determinó mediante la siguiente fórmula:

$$\beta_{SL} = \frac{E_d}{4\pi E_s}$$

La rigidez elástica (K_1) se calculó mediante la siguiente fórmula:

$$K_1 = \frac{F_M}{D_y}$$

Donde:

- D_y : Desplazamiento de fluencia.

Para determinar el diámetro del teflón (D) primero se determinó su área, para lo cual se usaron las siguientes fórmulas:

$$A_{Teflón(1)} = \frac{P_{serv}}{\sigma_s}$$

$$A_{Teflón(2)} = \frac{P_{último}}{\sigma_u}$$

$$D = \sqrt{\frac{4A_{Teflón}}{\pi}}$$

Donde:

- P_{serv} : Carga sobre el dispositivo generada por la combinación de carga vertical promedio.
- $P_{último}$: Carga sobre el dispositivo generada por la combinación de carga vertical máxima.
- σ_s : Esfuerzo axil permisible en servicio en el teflón.
- σ_u : Esfuerzo axil permisible en combinación con en el teflón.

El diámetro total de la placa deslizante (D_T) se determinó adicionando una cobertura al diámetro del teflón:

$$D_T = D + \text{Cobertura}$$

La rigidez a la compresión (K_v) se determinó mediante la siguiente fórmula:

$$K_v = \frac{E_\infty \pi D_T^2}{12 t_r}$$

Donde:

- E_∞ : Módulo volumétrico de la goma.
- t_r : Espesor del teflón.
- D_T : Diámetro total de la placa deslizante.

D. Procedimiento para el diseño de aislador TFP. Los cálculos iniciaron con las ecuaciones indicadas por McVitty y Constantinou (2015) en 2.2.4:

$$R_1 = R_4 \gg R_2 = R_3$$

$$\mu_2 = \mu_3 < \mu_1 = \mu_4$$

$$d_1 = d_4 \text{ y } d_2 = d_3$$

$$h_1 = h_4 \text{ y } h_2 = h_3$$

$$R_{i,eff} = R_i - h_i$$

$$d_i^* = \frac{R_{i,eff}}{R_i} d_i$$

Se planteó un predimensionamiento para los radios efectivos (R_{eff}) de los platos internos y externos:

$$R_{eff\ 1} = R_{eff\ 4} = 10D_M$$

$$R_{eff\ 2} = R_{eff\ 3} = \frac{R_{eff\ 1}}{8}$$

Se determinó la fuerza de fricción (F_f) en los platos internos y externos:

$$F_{f1} = F_{f4} = \mu_1 P_{serv}$$

$$F_{f2} = F_{f3} = \mu_2 P_{serv}$$

Se determinaron los desplazamientos en los platos internos y externos según lo indicado en Constantinou et al. (2011).

$$d_1^* = d_4^* < \frac{D_M}{2} - [(\mu_4 - \mu_3)R_{eff\ 3}]$$

$$d_2^* = d_3^* > (\mu_1 - \mu_2)R_{eff\ 2}$$

Se calculó el diámetro de la articulación deslizante rígida (D_R) por geometría:

$$D_R > \sqrt{\frac{4P_{serv}}{\pi\sigma_{m\acute{a}x}}}$$

Donde:

- $\sigma_{m\acute{a}x}$: Esfuerzo máximo a compresión del deslizador rígido.

La distancia vertical entre el punto pivote central y el centro de cada plato interno (h_2 y h_3) sumadas, debe ser como máximo el diámetro de la articulación deslizante rígida (D_R) para mantener la estabilidad del dispositivo.

$$h_2 + h_3 < D_R$$

La distancia vertical entre el punto pivote central y el centro de cada plato externo (h_1 y h_4) sumadas, se calculó como:

$$h_1 + h_4 = h_2 + h_3 + 2e_{\text{platos internos}}$$

Donde:

- $e_{\text{platos internos}}$: Espesor de los platos internos.

La rigidez vertical del dispositivo TFP (K_v) se calculó con la siguiente fórmula:

$$K_v = \frac{E \cdot A_R}{h_R}$$

Donde:

- E : Módulo de elasticidad del acero.
- A_R : Área transversal del deslizador rígido.
- h_R : Altura del deslizador rígido (h_2+h_3).

Se determinaron los parámetros correspondientes a la fase 1.

Leiva y Aguiar (2018) mencionan que el desplazamiento máximo (D_{u1}) y la fuerza máxima (F_{M1}) en la fase 01 se pueden determinar con las siguientes fórmulas:

$$D_{u1} = (\mu_1 - \mu_2)R_{eff\ 2}$$

$$F_{M1} = \frac{P_{serv} \cdot D_{u1}}{2R_{eff\ 2}} + F_{f2}$$

Constantinou et al. (2011) mencionan que la fuerza característica o de activación (Q_1) de la fase 01 se puede determinar mediante la siguiente fórmula:

$$Q_1 = P_{serv} \cdot \mu_2$$

Por geometría del diagrama de histéresis se determinaron las siguientes fórmulas:

$$K_{eff\ 1} = \frac{F_{M1}}{D_{u1}}$$

$$E_{d1} = 4Q_1D_{u1}$$

$$E_{s1} = 0.5D_{u1}F_{M1}$$

$$\beta_1 = \frac{E_{d1}}{4\pi E_{s1}}$$

Donde:

- $K_{eff\ 1}$: Rigidez efectiva del dispositivo TFP en la fase 1.
- E_{d1} : Energía disipada en un ciclo de histéresis del dispositivo TFP en la fase 1.
- E_{s1} : Energía de deformación máxima elástica del dispositivo TFP en la fase 1.
- β_1 : Amortiguamiento efectivo del dispositivo TFP en la fase 1.

Se determinaron los parámetros correspondientes a la fase 2.

McVitty y Constantinou (2015) mencionan que el desplazamiento máximo (D_{u2}), la fuerza máxima (F_{M2}) la fuerza característica o de activación (Q_2) en la fase 02 se pueden determinar con las siguientes fórmulas:

$$D_{u2} = D_{u1} + 2d_1^*$$

$$F_{M2} = \left(\frac{P_{serv}}{2R_{eff1}} \right) (D_{u2} - D_{u1}) + \mu_1 P_{serv}$$

$$Q_2 = \left(\frac{P_{serv}}{R_{eff1} + R_{eff2}} \right) [\mu_1 (R_{eff1} - R_{eff2}) + 2\mu_2 R_{eff2}]$$

La rigidez efectiva del dispositivo TFP en la fase 2 (K_{eff2}) se calculó por geometría con la siguiente fórmula:

$$K_{eff2} = \frac{F_{M2}}{D_{u2}}$$

Leiva y Aguiar (2018) mencionan la que energía disipada en un ciclo de histéresis del dispositivo TFP en la fase 2 (E_{d2}) se puede calcular mediante la siguiente fórmula:

$$E_{d2} = 4(D_{u1}\mu_2 P_{serv} - D_{u1}F_{M2} + D_{u2}\mu_1 P_{serv})$$

La energía de deformación máxima elástica del dispositivo TFP en la fase 2 (E_{s2}) se calculó por geometría del diagrama de histéresis con la siguiente fórmula:

$$E_{s2} = 0.5D_{u2}F_{M2}$$

El amortiguamiento efectivo del dispositivo TFP en la fase 2 (β_2) se calculó con la siguiente fórmula:

$$\beta_2 = \frac{E_{d2}}{4\pi E_{s2}}$$

Se determinaron los parámetros correspondientes a la fase 3.

McVitty y Constantinou (2015) mencionan que el desplazamiento máximo (D_{u3}), la fuerza máxima (F_{M3}) la fuerza característica o de activación (Q_3) en la fase 03 se pueden determinar con las siguientes fórmulas:

$$D_{u3} = 2d_1^* + 2d_2^*$$

$$F_{M3} = \left[\frac{P_{serv}(D_{u3} - D_{u2})}{2R_{eff2}} \right] + \left[\frac{P_{serv}(D_{u2} - D_{u1})}{2R_{eff1}} \right] + P_{serv}\mu_1$$

$$Q_3 = P_{serv} \left[\mu_1 + (\mu_2 - \mu_1) \left(\frac{R_{eff2}}{R_{eff1}} \right) \right]$$

La energía disipada en un ciclo de histéresis (E_{d3}) y la energía de deformación máxima elástica (E_{s3}) de la fase 3 del dispositivo TFP se calcularon por geometría del diagrama de histéresis con las siguientes fórmulas:

$$E_{d3} = 2E_{d1} + E_{d2}$$

$$E_{s3} = 0.5D_{u3}F_{M3}$$

El amortiguamiento efectivo del dispositivo TFP en la fase 3 (β_3) se calculó con la siguiente fórmula:

$$\beta_3 = \frac{E_{d3}}{4\pi E_{s3}}$$

La fuerza de restitución (F_R) del dispositivo TFP se calculó según la siguiente fórmula:

$$F_R = F_{M(D_M)} - F_{M(0.5D_M)}$$

Donde:

- $F_{M(D_M)}$: Fuerza al 100% del desplazamiento traslacional.
- $F_{M(0.5D_M)}$: Fuerza al 50% del desplazamiento traslacional.

La fuerza al 50% del desplazamiento traslacional ($F_{M(0.5D_M)}$) se calculó según la geometría del modelo trilineal para aisladores de TFP con la siguiente fórmula:

$$F_{M(0.5D_M)} = \left[\left(\frac{P_{serv}}{2R_{eff1}} \right) (0.5D_{u2} - D_{u1}) \right] + P_{serv}\mu_1$$

La Norma E.031 (MVCS, 2020c, p. 15) indica en el artículo 9 que la fuerza de restitución debe ser por lo menos 2.5% veces el peso de la estructura considerando el nivel de base.

$$F_R \geq 2.5\%P$$

3.6.2.7. Diseño de los sistemas de aislamiento.:

A. Diseño del sistema LRB+SL. Posterior al análisis estático preliminar, se procedió a realizar el diseño de los aisladores que constituyen el sistema LRB+SL. Este sistema fue conformado por tres tipos de aisladores LRB y un tipo de aislador SL, repartidos en planta de

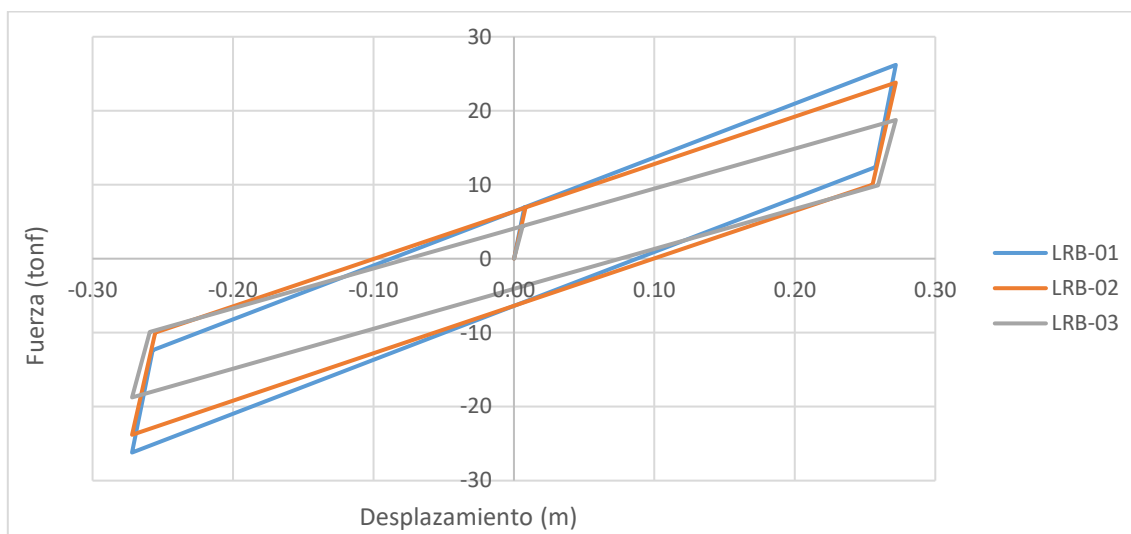
manera que la excentricidad natural sea la menor posible en ambas direcciones de análisis (X e Y) mediante un proceso iterativo, buscando el resultado más óptimo.

El diseño de los aisladores LRB fue realizado según lo indicado en Bridgestone (2022) y con las ecuaciones obtenidas del diagrama histérico bilineal para aisladores elastoméricos indicadas en 2.2.1 (véase Anexo C). En las tablas 14 y 15 se muestran los parámetros nominales de los dispositivos LRB y SL respectivamente.

Tabla 14

Parámetros nominales de los aisladores LRB

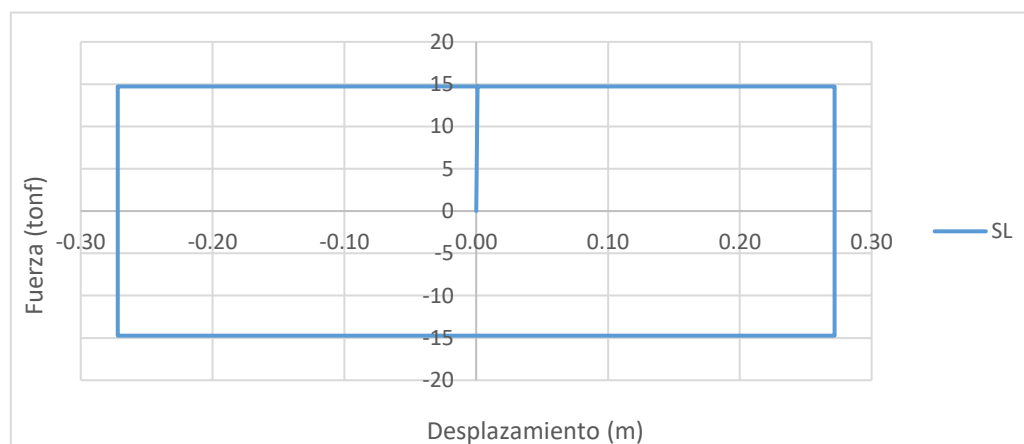
Descripción	Dispositivo			Unidad
	LRB-1	LRB-2	LRB-3	
Código del aislador del catálogo de Bridgestone	LH070G4	LH065G4	LH060G4	---
Rigidez efectiva (K_{eff})	96.37	87.55	68.97	tonf/m
Rigidez post-fluencia (K_2)	72.93	64.11	53.98	tonf/m
Rigidez inicial (K_1)	948.15	833.47	701.73	tonf/m
Fuerza característica (Q)	6.38	6.38	4.08	tonf
Desplazamiento máximo (D_M)	0.272	0.272	0.272	m
Deformación por corte (γ)	1.346	1.373	1.360	---
Desplazamiento de fluencia (D_y)	0.00729	0.00829	0.00630	m
Fuerza de fluencia (F_y)	6.91	6.91	4.42	tonf
Fuerza máxima (F_M)	26.21	23.81	18.76	tonf
Energía disipada en un ciclo de histéresis (E_d)	6.75	6.73	4.34	tonf.m
Energía de deformación máxima elástica (E_s)	3.56	3.24	2.55	tonf.m
Amortiguamiento efectivo (β_{eff})	15.08%	16.54%	13.54%	---

Figura 27*Diagrama histérico bilineal de los aisladores LRB (nominal)***Tabla 15***Parámetros nominales de los aisladores SL*

Descripción	Dispositivo SL	Unidad
Coefficiente de fricción (μ)	5.00%	---
Rigidez efectiva (K_{eff})	54.17	tonf/m
Fuerza característica (Q)	14.73	tonf
Desplazamiento máximo (D_M)	0.272	m
Desplazamiento de fluencia (D_y)	0.001	m
Fuerza de fluencia (F_y)	14.73	tonf
Fuerza máxima (F_M)	14.73	tonf
Rigidez inicial (K_1)	14734.95	tonf/m
Energía disipada en un ciclo de histéresis (E_d)	16.03	tonf.m
Energía de deformación máxima elástica (E_s)	2.00	tonf.m
Amortiguamiento efectivo (β_{eff})	63.66%	---

Figura 28

Diagrama histérico bilineal de los aisladores SL (nominal)



Los parámetros en límite superior de los dispositivos LRB y SL se muestran en las tablas 16 y 17 respectivamente, los cuales fueron calculados en función a los parámetros nominales previamente determinados, considerando los dispositivos como Clase I y usando los factores de modificación $\lambda_{\text{máx}}$ mostrados en la tabla 7 para aisladores de caucho con núcleo de plomo e interfaz sin lubricación.

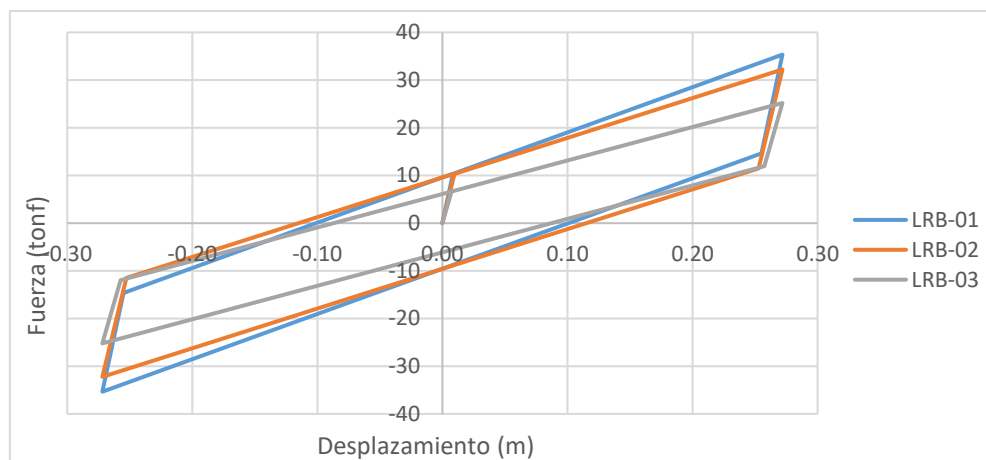
Tabla 16

Parámetros en límite superior de los aisladores LRB

Descripción	Dispositivo			Unidad
	LRB-1	LRB-2	LRB-3	
Código del aislador del catálogo de Bridgestone	LH070G4	LH065G4	LH060G4	---
	[E]	[D]	[E]	
Rigidez efectiva (K_{eff})	129.97	118.51	92.67	tonf/m
Rigidez post-fluencia (K_2)	94.81	83.35	70.17	tonf/m
Rigidez inicial (K_1)	1232.59	1083.51	912.25	tonf/m
Fuerza característica (Q)	9.57	9.57	6.13	tonf
Desplazamiento máximo (D_M)	0.272	0.272	0.272	m
Deformación por corte (γ)	1.346	1.373	1.360	---
Desplazamiento de fluencia (D_y)	0.00841	0.00957	0.00727	m
Fuerza de fluencia (F_y)	10.37	10.37	6.64	tonf
Fuerza máxima (F_M)	35.35	32.23	25.21	tonf
Energía disipada en un ciclo de histéresis (E_d)	10.09	10.04	6.48	tonf.m
Energía de deformación máxima elástica (E_s)	4.81	4.38	3.43	tonf.m
Amortiguamiento efectivo (β_{eff})	16.70%	18.24%	15.06%	---

Figura 29

Diagrama histerético bilineal de los aisladores LRB (límite superior)

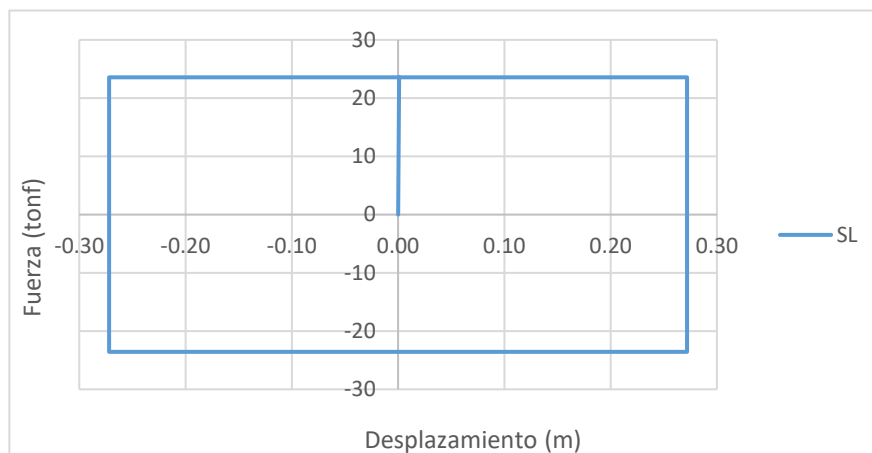
**Tabla 17**

Parámetros en límite superior de los aisladores SL

Descripción	Dispositivo SL	Unidad
Coefficiente de fricción (μ)	8.00%	---
Rigidez efectiva (K_{eff})	86.68	tonf/m
Fuerza característica (Q)	23.58	tonf
Desplazamiento máximo (D_M)	0.272	m
Desplazamiento de fluencia (D_y)	0.001	m
Fuerza de fluencia (F_y)	23.58	tonf
Fuerza máxima (F_M)	23.58	tonf
Rigidez inicial (K_1)	23575.93	tonf/m
Energía disipada en un ciclo de histéresis (E_d)	25.64	tonf.m
Energía de deformación máxima elástica (E_s)	3.21	tonf.m
Amortiguamiento efectivo (β_{eff})	63.66%	---

Figura 30

Diagrama histerético bilineal de los aisladores SL (límite superior)



Los parámetros en límite inferior de los dispositivos LRB y SL se muestran en las tablas 18 y 19 respectivamente, los cuales fueron calculados en función a los parámetros nominales previamente determinados, considerando los dispositivos como Clase I y usando los factores de modificación $\lambda_{\min}$ mostrados en la tabla 7 para aisladores de caucho con núcleo de plomo e interfaz sin lubricación.

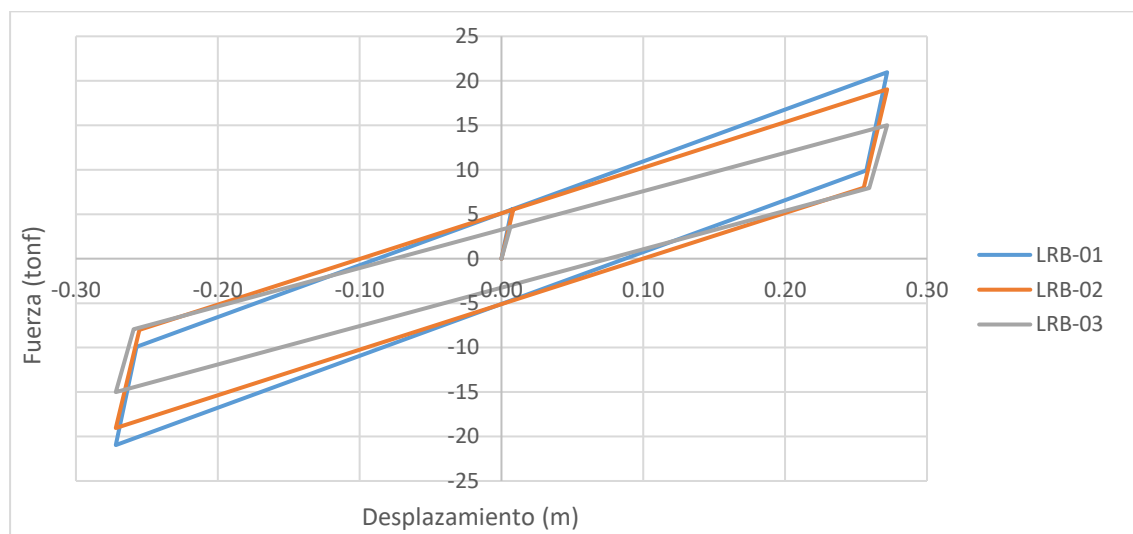
Tabla 18

Parámetros en límite inferior de los aisladores LRB

Descripción	Dispositivo			Unidad
	LRB-1	LRB-2	LRB-3	
Código del aislador del catálogo de Bridgestone	LH070G4	LH065G4	LH060G4	---
Rigidez efectiva (K_{eff})	[E]	[D]	[E]	---
Rigidez post-fluencia (K_2)	77.09	70.04	55.18	tonf/m
Rigidez inicial (K_1)	58.35	51.29	43.18	tonf/m
Rigidez inicial (K_1)	758.52	666.78	561.38	tonf/m
Fuerza característica (Q)	5.10	5.10	3.27	tonf
Desplazamiento máximo (D_M)	0.272	0.272	0.272	m
Deformación por corte (γ)	1.346	1.373	1.360	---
Desplazamiento de fluencia (D_y)	0.00729	0.00829	0.00630	m
Fuerza de fluencia (F_y)	5.53	5.53	3.54	tonf
Fuerza máxima (F_M)	20.97	19.05	15.01	tonf
Energía disipada en un ciclo de histéresis (E_d)	5.40	5.38	3.47	tonf.m
Energía de deformación máxima elástica (E_s)	2.85	2.59	2.04	tonf.m
Amortiguamiento efectivo (β_{eff})	15.08%	16.54%	13.54%	---

Figura 31

Diagrama histérico bilineal de los aisladores LRB (límite inferior)

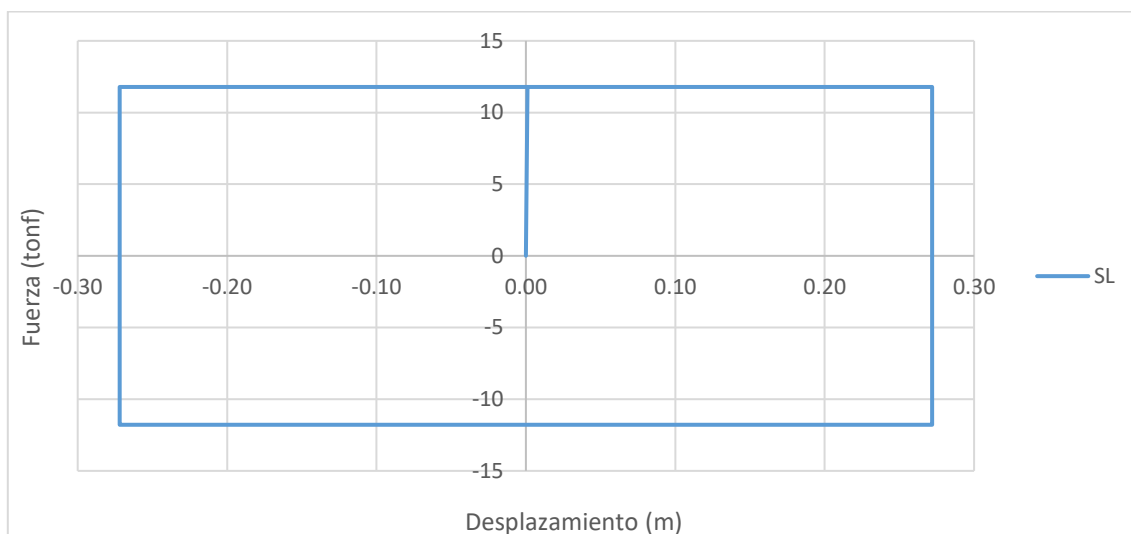
**Tabla 19**

Parámetros en límite inferior de los aisladores SL

Descripción	Dispositivo SL	Unidad
Coefficiente de fricción (μ)	4.00%	---
Rigidez efectiva (K_{eff})	43.34	tonf/m
Fuerza característica (Q)	11.79	tonf
Desplazamiento máximo (D_M)	0.272	m
Desplazamiento de fluencia (D_y)	0.001	m
Fuerza de fluencia (F_y)	11.79	tonf
Fuerza máxima (F_M)	11.79	tonf
Rigidez inicial (K_1)	11787.96	tonf/m
Energía disipada en un ciclo de histéresis (E_d)	12.82	tonf.m
Energía de deformación máxima elástica (E_s)	1.60	tonf.m
Amortiguamiento efectivo (β_{eff})	63.66%	---

Figura 32

Diagrama histérico bilineal de los aisladores SL (límite inferior)



Para obtener un aislamiento óptimo, se buscó distribuir los elementos estructurales y los aisladores con el objetivo de lograr que las participaciones modales de los tres primeros modos de vibración de la estructura en condiciones nominales sean mayores al 90%.

Tabla 20

Participación modal de masas en el sistema LRB+SL

Condiciones	Modo	Periodo (s)	UX	UY	RZ
Nominal	1	3.219	8.44%	91.30%	0.23%
	2	3.217	91.48%	8.49%	0.01%
	3	2.882	0.06%	0.19%	99.73%
Límite superior	1	2.750	6.91%	92.79%	0.26%
	2	2.747	92.99%	6.95%	0.01%
	3	2.489	0.06%	0.21%	99.67%
Límite inferior	1	3.589	10.02%	89.72%	0.24%
	2	3.587	89.90%	10.08%	0.01%
	3	3.213	0.06%	0.19%	99.73%

Los parámetros totales del sistema LRB+SL fueron calculados para las condiciones nominales, de límite superior e inferior y se muestran en la tabla 21. En la tabla 22 se muestra la verificación de la fuerza de restitución del sistema LRB+SL.

Tabla 21*Parámetros del sistema de aislamiento LRB+SL*

Descripción	Límites de diseño			Unidad
	Límite inferior	Nominal	Límite superior	
Cantidad de dispositivos		45		und
Rigidez efectiva total ($K_{\text{eff-T}}$)	2937.71	3672.14	5082.30	tonf/m
Peso de servicio total ($P_{\text{serv T}}$)	9245.55	9245.55	9245.55	tonf
Energía disipada en un ciclo de histéresis total ($E_{\text{d-T}}$)	301.75	377.19	578.62	tonf.m
Energía de deformación máxima elástica total ($E_{\text{s-T}}$)	108.59	135.74	187.87	tonf.m
Rigidez vertical total ($K_{\text{v-T}}$)	12609380.38	12609380.38	12609380.38	tonf/m
Fuerza característica total (Q_{T})	282.50	353.13	542.96	tonf
Amortiguamiento efectivo total ($\beta_{\text{eff T}}$)	22.11%	22.11%	24.51%	---
Factor B_{M}	1.54	1.54	1.59	---
Desplazamiento máximo (D_{M})	0.272	0.272	0.264	m
Periodo fundamental (T)	3.559	3.184	2.706	s

Tabla 22*Verificación de la fuerza de restitución del sistema LRB+SL*

Descripción	Límites de diseño			Unidad
	Límite inferior	Nominal	Límite superior	
Fuerza Máxima al 100% (FM_{DM})	692.68	865.85	1169.70	tonf
Fuerza Máxima al 50% ($FM_{0.5\text{DM}}$)	434.54	543.18	750.24	tonf
$FM_{\text{DM}} - FM_{0.5\text{DM}}$	258.13	322.67	419.47	tonf
Peso de servicio total ($P_{\text{serv T}}$)	9245.55	9245.55	9245.55	tonf
$0.025 P_{\text{serv T}}$	231.14	231.14	231.14	tonf
Verificación de la fuerza restitución	OK	OK	OK	---

B. Diseño del sistema LRB+HDR+SL. Posterior al análisis estático preliminar, se procedió a realizar el diseño de los aisladores que conforman el sistema LRB+HDR+SL. Este sistema fue conformado por tres tipos de aisladores LRB, un tipo de aislador HDR y un tipo de aislador SL, repartidos en planta de manera que la excentricidad natural sea la menor posible en ambas direcciones de análisis (X e Y) mediante un proceso iterativo, buscando el resultado más óptimo.

El diseño de los aisladores LRB y HDR fue realizado según lo indicado en Bridgestone (2022) y con las ecuaciones obtenidas del diagrama histerético bilineal para aisladores elastoméricos indicadas en 2.2.1 (véase Anexo C).

En las tablas 23, 24 y 25 se muestran los parámetros nominales de los dispositivos LRB, HDR y SL respectivamente.

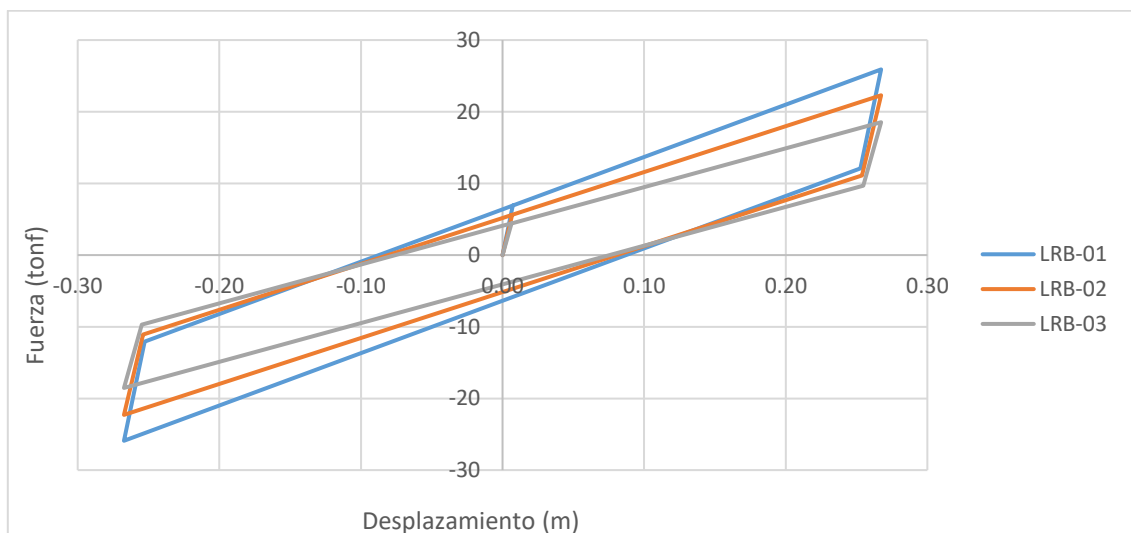
Tabla 23

Parámetros nominales de los aisladores LRB

Descripción	Dispositivo			Unidad
	LRB-1	LRB-2	LRB-3	
Código del aislador del catálogo de Bridgestone	LH070G4	LH065G4	LH060G4	---
Rigidez efectiva (K_{eff})	[E]	[E]	[E]	tonf/m
Rigidez post-fluencia (K_2)	96.92	83.40	69.34	tonf/m
Rigidez inicial (K_1)	73.08	64.10	54.09	tonf/m
Fuerza característica (Q)	950.08	833.28	703.16	tonf
Desplazamiento máximo (D_M)	6.38	5.17	4.08	tonf
Deformación por corte (γ)	0.267	0.267	0.267	m
Desplazamiento de fluencia (D_y)	1.323	1.350	1.337	---
Fuerza de fluencia (F_y)	0.00728	0.00672	0.00629	m
Fuerza máxima (F_M)	6.91	5.60	4.42	tonf
Energía disipada en un ciclo de histéresis (E_d)	25.92	22.30	18.54	tonf
Energía de deformación máxima elástica (E_s)	6.64	5.39	4.26	tonf.m
Amortiguamiento efectivo (β_{eff})	3.46	2.98	2.48	tonf.m
	15.25%	14.38%	13.69%	---

Figura 33

Diagrama histérico bilineal de los aisladores LRB (nominal)

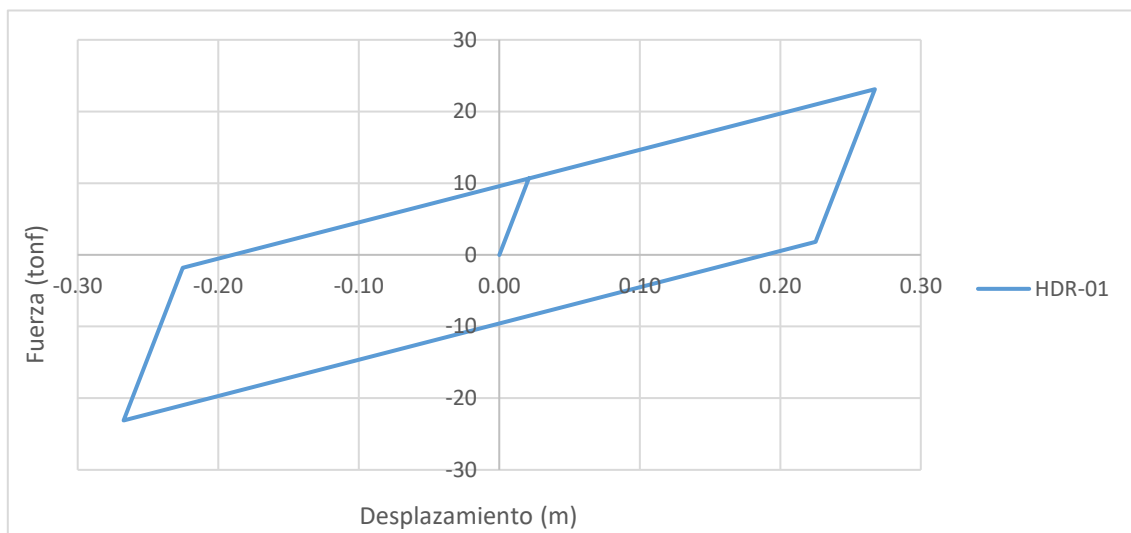
**Tabla 24**

Parámetros nominales de los aisladores HDR

Descripción	Dispositivo HDR-1	Unidad
Código del aislador del catálogo de Bridgestone	HH080X4S (20cm)	---
Rigidez efectiva (K_{eff})	86.45	tonf/m
Rigidez post-fluencia (K_2)	50.61	tonf/m
Rigidez inicial (K_1)	506.05	tonf/m
Fuerza característica (Q)	9.59	tonf
Desplazamiento máximo (D_M)	0.267	m
Deformación por corte (γ)	1.337	---
Desplazamiento de fluencia (D_y)	0.02106	m
Fuerza de fluencia (F_y)	10.66	tonf
Fuerza máxima (F_M)	23.12	tonf
Energía disipada en un ciclo de histéresis (E_d)	9.45	tonf.m
Energía de deformación máxima elástica (E_s)	3.09	tonf.m
Amortiguamiento efectivo (β_{eff})	24.33%	---

Figura 34

Diagrama histérico bilineal de los aisladores HDR (nominal)

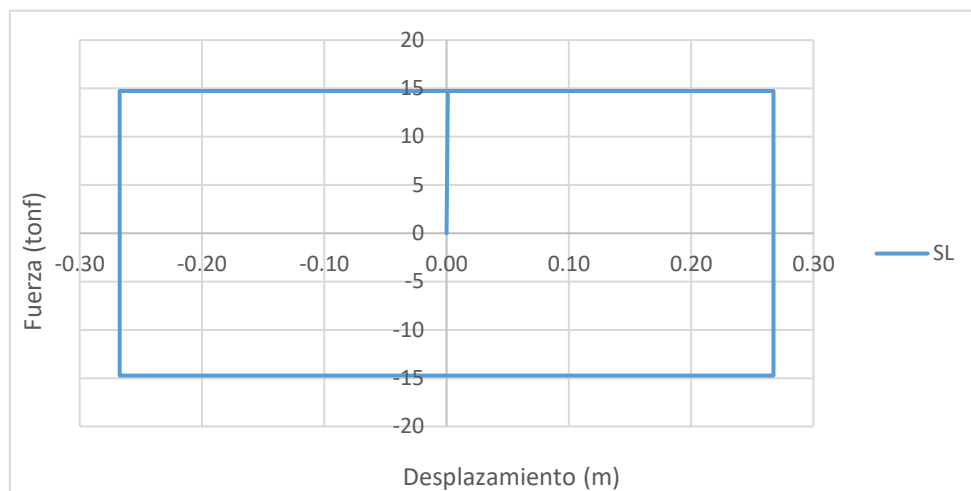
**Tabla 25**

Parámetros nominales de los aisladores SL

Descripción	Dispositivo SL	Unidad
Coefficiente de fricción (μ)	5.00%	---
Rigidez efectiva (K_{eff})	55.10	tonf/m
Fuerza característica (Q)	14.73	tonf
Desplazamiento máximo (D_M)	0.267	m
Desplazamiento de fluencia (D_y)	0.001	m
Fuerza de fluencia (F_y)	14.73	tonf
Fuerza máxima (F_M)	14.73	tonf
Rigidez inicial (K_1)	14734.95	tonf/m
Energía disipada en un ciclo de histéresis (E_d)	15.76	tonf.m
Energía de deformación máxima elástica (E_s)	1.97	tonf.m
Amortiguamiento efectivo (β_{eff})	63.66%	---

Figura 35

Diagrama histérico bilineal de los aisladores SL (nominal)



Los parámetros en límite superior de los dispositivos LRB, HDR y SL se muestran en las tablas 26, 27 y 28 respectivamente, los cuales fueron calculados en función a los parámetros nominales previamente determinados, considerando los dispositivos como Clase I y usando los factores de modificación $\lambda_{\text{máx}}$ mostrados en la tabla 7 para aisladores de caucho con núcleo de plomo, aisladores de alto amortiguamiento e interfaz sin lubricación.

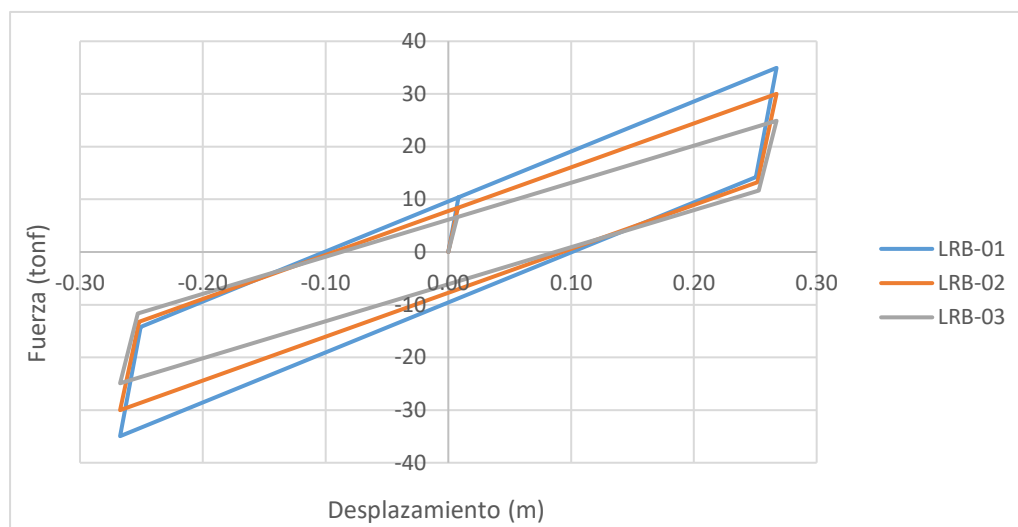
Tabla 26

Parámetros en límite superior de los aisladores LRB

Descripción	Dispositivo			Unidad
	LRB-1	LRB-2	LRB-3	
Código del aislador del catálogo de Bridgestone	LH070G4	LH065G4	LH060G4	---
Rigidez efectiva (K_{eff})	130.77	112.29	93.20	tonf/m
Rigidez post-fluencia (K_2)	95.01	83.33	70.32	tonf/m
Rigidez inicial (K_1)	1235.11	1083.27	914.11	tonf/m
Fuerza característica (Q)	9.57	7.75	6.13	tonf
Desplazamiento máximo (D_M)	0.267	0.267	0.267	m
Deformación por corte (γ)	1.323	1.350	1.337	---
Desplazamiento de fluencia (D_y)	0.00839	0.00775	0.00726	m
Fuerza de fluencia (F_y)	10.37	8.40	6.64	tonf
Fuerza máxima (F_M)	34.97	30.03	24.92	tonf
Energía disipada en un ciclo de histéresis (E_d)	9.91	8.05	6.37	tonf.m
Energía de deformación máxima elástica (E_s)	4.67	4.01	3.33	tonf.m
Amortiguamiento efectivo (β_{eff})	16.88%	15.96%	15.22%	---

Figura 36

Diagrama histerético bilineal de los aisladores LRB (límite superior)

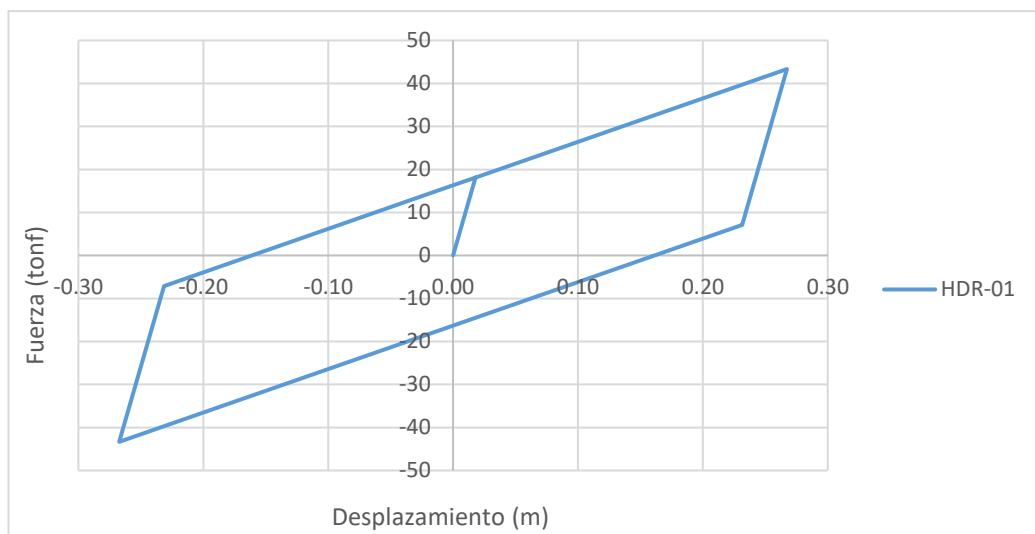
**Tabla 27**

Parámetros en límite superior de los aisladores HDR

Descripción	Dispositivo HDR-1	Unidad
Código del aislador del catálogo de Bridgestone	HH080X4S (20cm)	---
Rigidez efectiva (K_{eff})	172.90	tonf/m
Rigidez post-fluencia (K_2)	101.21	tonf/m
Rigidez inicial (K_1)	1012.11	tonf/m
Fuerza característica (Q)	16.30	tonf
Desplazamiento máximo (D_M)	0.267	m
Deformación por corte (γ)	1.337	---
Desplazamiento de fluencia (D_y)	0.01790	m
Fuerza de fluencia (F_y)	18.11	tonf
Fuerza máxima (F_M)	43.36	tonf
Energía disipada en un ciclo de histéresis (E_d)	16.27	tonf.m
Energía de deformación máxima elástica (E_s)	6.18	tonf.m
Amortiguamiento efectivo (β_{eff})	20.94%	---

Figura 37

Diagrama histerético bilineal de los aisladores HDR (límite superior)

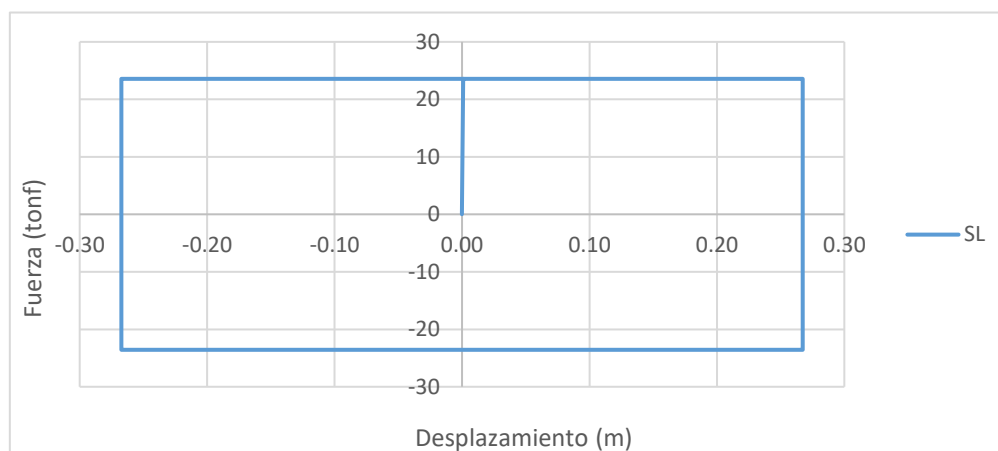
**Tabla 28**

Parámetros en límite superior de los aisladores SL

Descripción	Dispositivo SL	Unidad
Coeficiente de fricción (μ)	8.00%	---
Rigidez efectiva (K_{eff})	88.16	tonf/m
Fuerza característica (Q)	23.58	tonf
Desplazamiento máximo (D_M)	0.267	m
Desplazamiento de fluencia (D_y)	0.001	m
Fuerza de fluencia (F_y)	23.58	tonf
Fuerza máxima (F_M)	23.58	tonf
Rigidez inicial (K_1)	23575.93	tonf/m
Energía disipada en un ciclo de histéresis (E_d)	25.21	tonf.m
Energía de deformación máxima elástica (E_s)	3.15	tonf.m
Amortiguamiento efectivo (β_{eff})	63.66%	---

Figura 38

Diagrama histérico bilineal de los aisladores SL (límite superior)



Los parámetros en límite inferior de los dispositivos LRB, HDR y SL se muestran en las tablas 29, 30 y 31 respectivamente, los cuales fueron calculados en función a los parámetros nominales previamente determinados, considerando los dispositivos como Clase I y usando los factores de modificación $\lambda_{\min}$ mostrados en la tabla 7 para aisladores de caucho con núcleo de plomo, aisladores de alto amortiguamiento e interfaz sin lubricación.

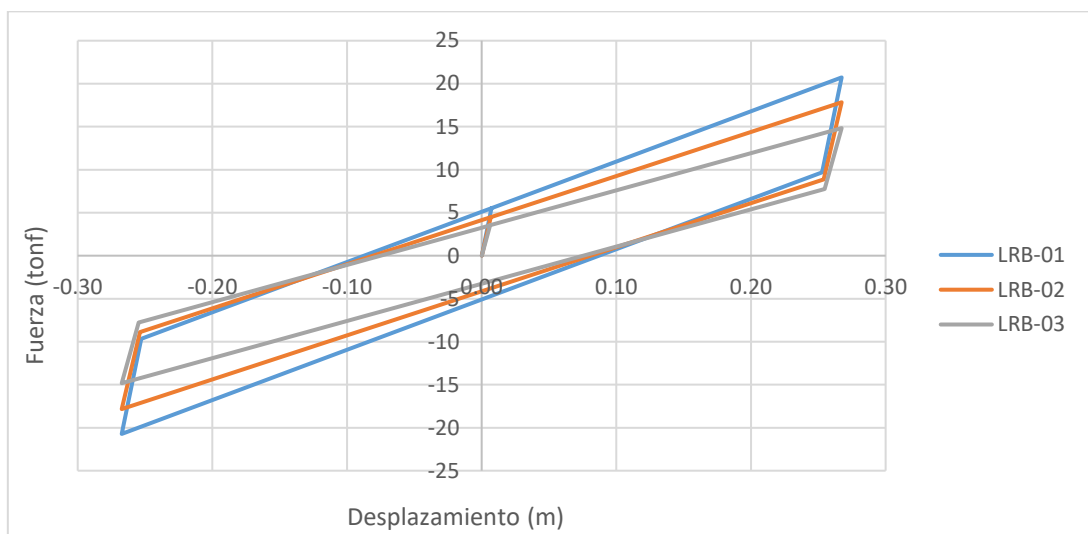
Tabla 29

Parámetros en límite inferior de los aisladores LRB

Descripción	Dispositivo			Unidad
	LRB-1	LRB-2	LRB-3	
Código del aislador del catálogo de Bridgestone	LH070G4	LH065G4	LH060G4	---
Rigidez efectiva (K_{eff})	[E]	[E]	[E]	tonf/m
Rigidez post-fluencia (K_2)	77.53	66.72	55.47	tonf/m
Rigidez inicial (K_1)	58.47	51.28	43.27	tonf/m
Fuerza característica (Q)	760.07	666.63	562.53	tonf
Desplazamiento máximo (D_M)	5.10	4.13	3.27	m
Deformación por corte (γ)	0.267	0.267	0.267	---
Desplazamiento de fluencia (D_y)	1.323	1.350	1.337	m
Fuerza de fluencia (F_y)	0.00728	0.00672	0.00629	tonf
Fuerza máxima (F_M)	5.53	4.48	3.54	tonf
Energía disipada en un ciclo de histéresis (E_d)	20.73	17.84	14.83	tonf.m
Energía de deformación máxima elástica (E_s)	5.31	4.31	3.41	tonf.m
Amortiguamiento efectivo (β_{eff})	2.77	2.38	1.98	---
	15.25%	14.38%	13.69%	

Figura 39

Diagrama histerético bilineal de los aisladores LRB (límite inferior)

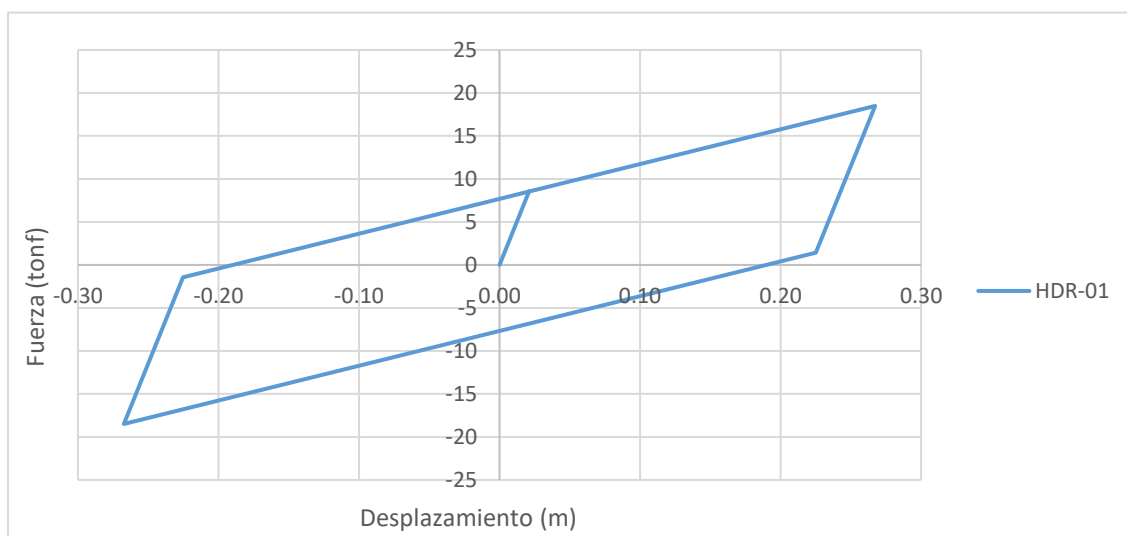
**Tabla 30**

Parámetros en límite inferior de los aisladores HDR

Descripción	Dispositivo HDR-1	Unidad
Código del aislador del catálogo de Bridgestone	HH080X4S (20cm)	---
Rigidez efectiva (K_{eff})	69.16	tonf/m
Rigidez post-fluencia (K_2)	40.48	tonf/m
Rigidez inicial (K_1)	404.84	tonf/m
Fuerza característica (Q)	7.67	tonf
Desplazamiento máximo (D_M)	0.267	m
Deformación por corte (γ)	1.337	---
Desplazamiento de fluencia (D_y)	0.02106	m
Fuerza de fluencia (F_y)	8.52	tonf
Fuerza máxima (F_M)	18.49	tonf
Energía disipada en un ciclo de histéresis (E_d)	7.56	tonf.m
Energía de deformación máxima elástica (E_s)	2.47	tonf.m
Amortiguamiento efectivo (β_{eff})	24.33%	---

Figura 40

Diagrama histerético bilineal de los aisladores HDR (límite inferior)

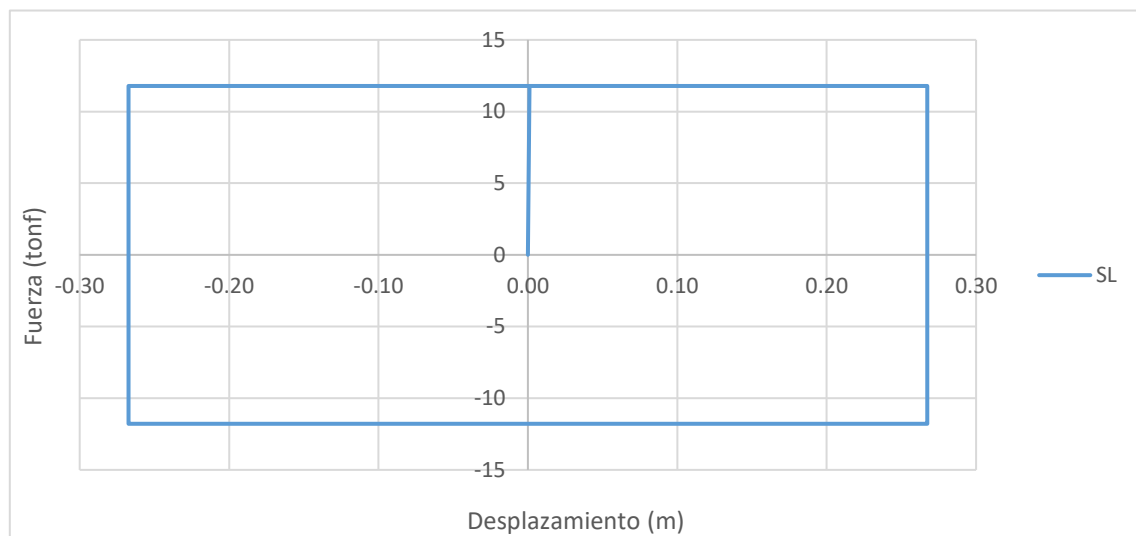
**Tabla 31**

Parámetros en límite inferior de los aisladores SL

Descripción	Dispositivo SL	Unidad
Coefficiente de fricción (μ)	4.00%	---
Rigidez efectiva (K_{eff})	44.08	tonf/m
Fuerza característica (Q)	11.79	tonf
Desplazamiento máximo (D_M)	0.267	m
Desplazamiento de fluencia (D_y)	0.001	m
Fuerza de fluencia (F_y)	11.79	tonf
Fuerza máxima (F_M)	11.79	tonf
Rigidez inicial (K_1)	11787.96	tonf/m
Energía disipada en un ciclo de histéresis (E_d)	12.60	tonf.m
Energía de deformación máxima elástica (E_s)	1.58	tonf.m
Amortiguamiento efectivo (β_{eff})	63.66%	---

Figura 41

Diagrama histerético bilineal de los aisladores SL (límite inferior)



Para obtener un aislamiento óptimo, se buscó distribuir los elementos estructurales y los aisladores con el objetivo de lograr que las participaciones modales de los tres primeros modos de vibración de la estructura en condiciones nominales sean mayores al 90%.

Tabla 32

Participación modal de masas en el sistema LRB+HDR+SL

Condiciones	Modo	Periodo (s)	UX	UY	RZ
Nominal	1	3.290	8.70%	91.03%	0.25%
	2	3.288	91.22%	8.75%	0.01%
	3	2.955	0.06%	0.20%	99.71%
Límite superior	1	2.732	8.24%	91.24%	0.47%
	2	2.730	91.61%	8.33%	0.02%
	3	2.530	0.11%	0.38%	99.45%
Límite inferior	1	3.669	10.31%	89.41%	0.26%
	2	3.667	89.61%	10.37%	0.01%
	3	3.294	0.06%	0.21%	99.71%

Los parámetros totales del sistema LRB+HDR+SL fueron calculados para las condiciones nominales, de límite superior e inferior y se muestran en la tabla 33. En la tabla 34 se muestra la verificación de la fuerza de restitución del sistema LRB+HDR+SL.

Tabla 33*Parámetros del sistema de aislamiento LRB+HDR+SL*

Descripción	Límites de diseño			Unidad
	Límite inferior	Nominal	Límite superior	
Cantidad de dispositivos		45		---
Rigidez efectiva total ($K_{\text{eff-T}}$)	2809.12	3511.41	5151.06	tonf/m
Peso de servicio total ($P_{\text{serv T}}$)	9250.38	9250.38	9250.38	tonf
Energía disipada en un ciclo de histéresis total ($E_{\text{d-T}}$)	295.54	369.43	579.38	tonf.m
Energía de deformación máxima elástica total ($E_{\text{s-T}}$)	100.37	125.47	184.06	tonf.m
Rigidez vertical total ($K_{\text{v-T}}$)	12972349.99	12972349.99	12972349.99	tonf/m
Fuerza característica total (Q_{T})	282.63	353.28	554.25	tonf
Amortiguamiento efectivo total ($\beta_{\text{eff T}}$)	23.43%	23.43%	25.05%	---
Factor B_{M}	1.57	1.57	1.60	---
Desplazamiento máximo (D_{M})	0.267	0.267	0.262	m
Periodo fundamental (T)	3.640	3.256	2.688	s

Tabla 34*Verificación de la fuerza de restitución del sistema LRB+HDR+SL*

Descripción	Límites de diseño			Unidad
	Límite inferior	Nominal	Límite superior	
Fuerza Máxima al 100% (FM_{DM})	633.07	791.34	1126.87	tonf
Fuerza Máxima al 50% ($FM_{0.5\text{DM}}$)	398.91	498.64	722.68	tonf
$FM_{\text{DM}} - FM_{0.5\text{DM}}$	234.16	292.70	404.19	tonf
Peso de servicio total ($P_{\text{serv T}}$)	9250.38	9250.38	9250.38	tonf
$0.025 P_{\text{serv T}}$	231.26	231.26	231.26	tonf
Verificación de la fuerza restitución	OK	OK	OK	---

C. Diseño del sistema TFP. Posterior al análisis estático preliminar, se procedió a realizar el diseño de los aisladores que conforman el sistema TFP. Este sistema fue conformado por tres tipos de aisladores TFP, repartidos en planta de manera que la excentricidad natural sea la menor posible en ambas direcciones de análisis (X e Y) mediante un proceso iterativo, buscando el resultado más óptimo.

El diseño de los aisladores TFP (véase Anexo C) fue realizado según lo indicado en McVitty y Constantinou (2015) y considerando las recomendaciones de Leiva y Aguiar (2018).

En la tabla 35 se muestran los parámetros nominales de los dispositivos TFP.

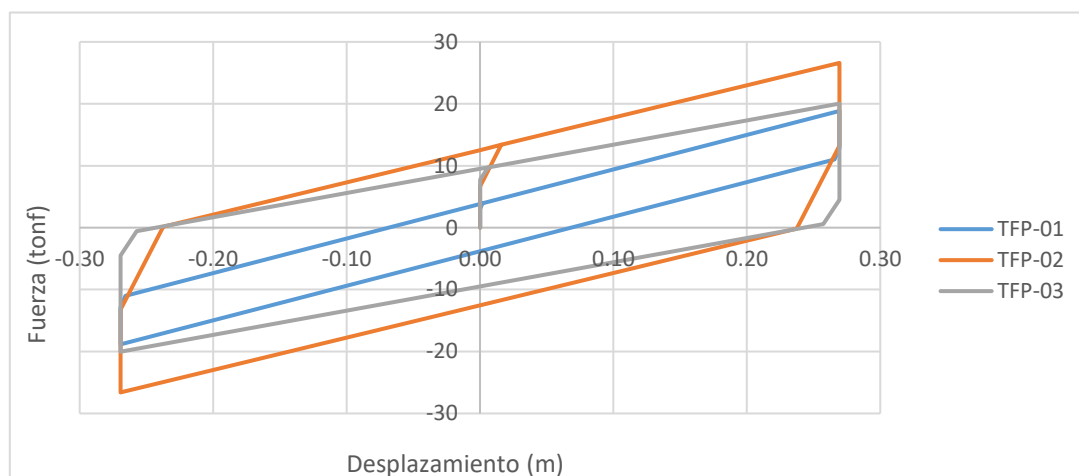
Tabla 35

Parámetros nominales de los aisladores TFP

Descripción	Dispositivo			Unidad
	TFP-1	TFP-2	TFP-3	
Coeficiente de fricción Platos 1 y 4 (μ_1, μ_4)	1.30%	8.00%	10.00%	---
Coeficiente de fricción Platos 2 y 3 (μ_2, μ_3)	1.00%	4.00%	8.00%	---
Fase 02				
Desplazamiento máximo de la Fase 02 (D_{u2})	0.2694	0.2694	0.2694	m
Fuerza máxima en la Fase 02 (F_{M2})	18.84	26.60	20.03	tonf
Fuerza de activación en la Fase 02 (Q_2)	3.73	11.88	9.30	tonf
Rigidez efectiva en la Fase 02 (K_{eff2})	69.94	98.75	74.35	tonf/m
Energía disipada en un ciclo de activación en la Fase 02 (E_{d2})	4.098	13.131	10.182	tonf.m
Energía elástica de deformación máxima en la Fase 02 (E_{s2})	2.538	3.583	2.698	tonf.m
Amortiguamiento efectivo en la Fase 02 (β_2)	12.85%	29.16%	30.03%	---

Figura 42

Diagrama histerético trilineal de los aisladores TFP (nominal)



Los parámetros en límite superior de los dispositivos TFP se muestran en la tabla 36, los cuales fueron calculados en función a los parámetros nominales previamente determinados, considerando los dispositivos como Clase I y usando los factores de modificación $\lambda_{\text{máx}}$ mostrados en la tabla 7 para interfaz sin lubricación.

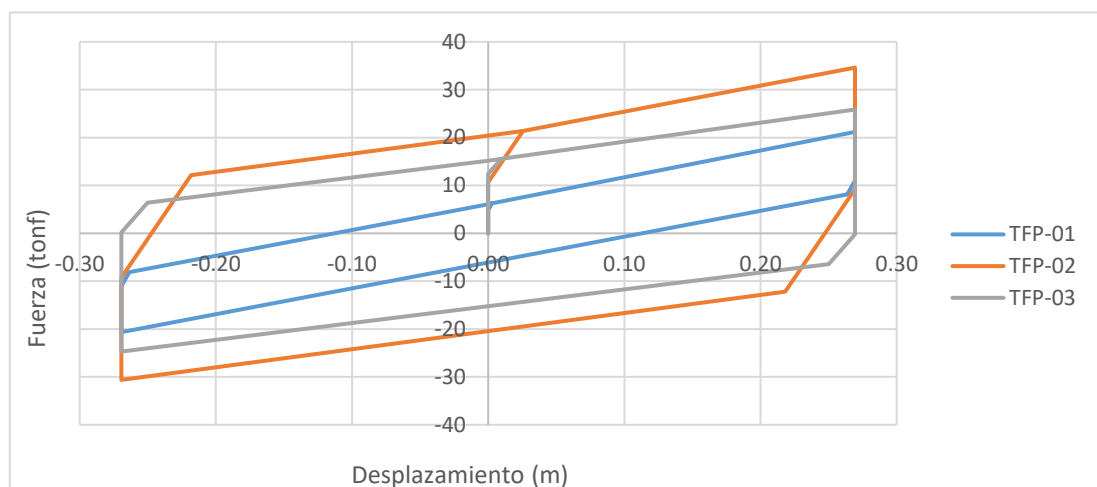
Tabla 36

Parámetros en límite superior de los aisladores TFP

Descripción	Dispositivo			Unidad
	TFP-1	TFP-2	TFP-3	
Coeficiente de fricción Platos 1 y 4 (μ_1, μ_4)	2.08%	12.80%	16.00%	---
Coeficiente de fricción Platos 2 y 3 (μ_2, μ_3)	1.60%	6.40%	12.80%	---
Fase 02				
Desplazamiento máximo de la Fase 02 (D_{u2})	0.2705	0.2790	0.2730	m
Fuerza máxima en la Fase 02 (F_{M2})	21.19	34.62	25.86	tonf
Fuerza de activación en la Fase 02 (Q_2)	5.96	19.01	14.89	tonf
Rigidez efectiva en la Fase 02 ($K_{\text{eff}2}$)	78.33	124.10	94.74	tonf/m
Energía disipada en un ciclo de activación en la Fase 02 (E_{d2})	6.577	21.420	16.471	tonf.m
Energía elástica de deformación máxima en la Fase 02 (E_{s2})	2.865	4.830	3.530	tonf.m
Amortiguamiento efectivo en la Fase 02 (β_2)	18.27%	35.29%	37.13%	---

Figura 43

Diagrama histerético trilineal de los aisladores TFP (límite superior)



Los parámetros en límite inferior de los dispositivos de aislamiento TFP se muestran en la tabla 37, los cuales fueron calculados en función a los parámetros nominales previamente determinados, considerando los dispositivos como Clase I y usando los factores de modificación $\lambda_{\min}$ mostrados en la tabla 7 para interfaz sin lubricación.

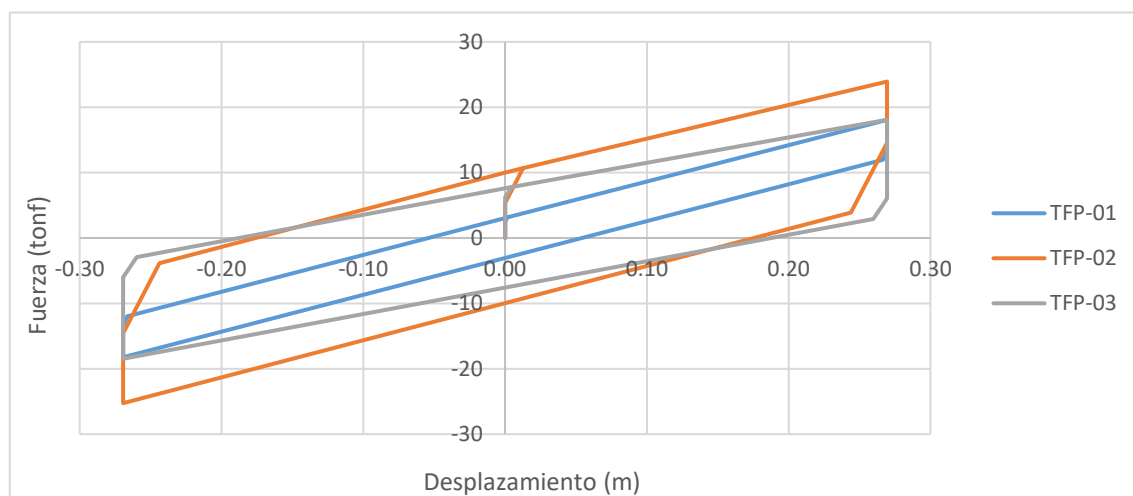
Tabla 37

Parámetros en límite inferior de los aisladores TFP

Descripción	Dispositivo			Unidad
	TFP-1	TFP-2	TFP-3	
Coefficiente de fricción Platos 1 y 4 (μ_1, μ_4)	1.04%	6.40%	8.00%	---
Coefficiente de fricción Platos 2 y 3 (μ_2, μ_3)	0.80%	3.20%	6.40%	---
Fase 02				
Desplazamiento máximo de la Fase 02 (D_{u2})	0.2690	0.2662	0.2682	m
Fuerza máxima en la Fase 02 (F_{M2})	18.06	23.93	18.09	tonf
Fuerza de activación en la Fase 02 (Q_2)	2.98	9.51	7.44	tonf
Rigidez efectiva en la Fase 02 (K_{eff2})	67.13	89.89	67.44	tonf/m
Energía disipada en un ciclo de activación en la Fase 02 (E_{d2})	3.275	10.436	8.116	tonf.m
Energía elástica de deformación máxima en la Fase 02 (E_{s2})	2.429	3.185	2.425	tonf.m
Amortiguamiento efectivo en la Fase 02 (β_2)	10.73%	26.08%	26.63%	---

Figura 44

Diagrama histerético trilineal de los aisladores TFP (límite inferior)



Para obtener un aislamiento óptimo, se buscó distribuir los elementos estructurales y los aisladores con el objetivo de lograr que las participaciones modales de los tres primeros modos de vibración de la estructura en condiciones nominales sean mayores al 90%.

Tabla 38

Participación modal de masas en el sistema TFP

Condiciones	Modo	Periodo (s)	UX	UY	RZ
Nominal	1	3.195	9.65%	90.04%	0.29%
	2	3.193	90.29%	9.69%	0.00%
	3	2.857	0.04%	0.25%	99.68%
Límite superior	1	2.919	8.45%	91.30%	0.22%
	2	2.917	91.49%	8.47%	0.00%
	3	2.583	0.03%	0.19%	99.73%
Límite inferior	1	3.311	10.15%	89.51%	0.32%
	2	3.309	89.79%	10.19%	0.00%
	3	2.976	0.05%	0.28%	99.65%

Los parámetros totales del sistema TFP fueron calculados para las condiciones nominales, de límite superior e inferior y se muestran en la tabla 39.

En la tabla 40 se muestra la verificación de la fuerza de restitución del sistema TFP.

Tabla 39*Parámetros del sistema de aislamiento TFP*

Descripción	Límites de diseño			Unidad
	Límite inferior	Nominal	Límite superior	
Cantidad de dispositivos		45		---
Rigidez efectiva total ($K_{\text{eff-T}}$)	3477.17	3741.04	4505.88	tonf/m
Peso de servicio total ($P_{\text{serv T}}$)	9273.59	9273.59	9273.59	tonf
Energía disipada en un ciclo de histéresis total ($E_{\text{d-T}}$)	309.95	389.39	632.39	tonf.m
Energía de deformación máxima elástica total ($E_{\text{s-T}}$)	124.40	135.74	170.88	tonf.m
Rigidez vertical total ($K_{\text{v-T}}$)	106028752.06	106028752.06	106028752.06	tonf/m
Fuerza característica total (Q_{T})	282.53	353.16	565.06	tonf
Amortiguamiento efectivo total ($\beta_{\text{eff T}}$)	19.83%	22.83%	29.45%	---
Factor B_{M}	1.50	1.56	1.69	---
Desplazamiento máximo (D_{M})	0.280	0.269	0.248	m
Periodo fundamental (T)	3.276	3.158	2.878	s

Tabla 40*Verificación de la fuerza de restitución del sistema TFP*

Descripción	Límites de diseño			Unidad
	Límite inferior	Nominal	Límite superior	
Fuerza Máxima al 100% (FM_{DM})	930.12	1007.79	1240.79	tonf
Fuerza Máxima al 50% ($FM_{0.5\text{DM}}$)	612.49	688.18	915.26	tonf
$FM_{\text{DM}} - FM_{0.5\text{DM}}$	317.63	319.60	325.53	tonf
Peso de servicio total ($P_{\text{serv T}}$)	9273.59	9273.59	9273.59	tonf
$0.025 P_{\text{serv T}}$	231.84	231.84	231.84	tonf
Verificación de la fuerza restitución	OK	OK	OK	---

3.6.2.8. Balance torsional de los sistemas de aislamiento. Se determinó el centro de masa y rigidez de los sistemas de aislamiento para calcular su excentricidad natural, reduciéndola lo más posible en ambas direcciones de análisis. Los dispositivos fueron ubicados convenientemente, considerando su rigidez efectiva (K_{eff}) y carga de servicio (P_{serv}).

El centro de masa de los sistemas de aislamiento se calculó según:

$$X_{CM} = \frac{\sum P_{serv\ i} X_i}{P_{serv\ T}}$$

$$Y_{CM} = \frac{\sum P_{serv\ i} Y_i}{P_{serv\ T}}$$

Donde:

- X_{CM} : Ubicación del centro de masa del sistema de aislamiento en el eje X.
- Y_{CM} : Ubicación del centro de masa del sistema de aislamiento en el eje Y.
- $P_{serv\ i}$: Combinación de carga vertical promedio sobre el i-ésimo aislador.
- $P_{serv\ T}$: Combinación de carga vertical promedio total sobre el sistema de aislamiento.

El centro de rigidez de los sistemas de aislamiento se calculó con las siguientes fórmulas:

$$X_{CR} = \frac{\sum K_{eff\ i} X_i}{K_M}$$

$$Y_{CR} = \frac{\sum K_{eff\ i} Y_i}{K_M}$$

Donde:

- X_{CR} : Ubicación del centro de rigidez del sistema de aislamiento en el eje X.
- Y_{CR} : Ubicación del centro de rigidez del sistema de aislamiento en el eje Y.
- $K_{eff\ i}$: Rigidez efectiva del i-ésimo aislador.
- K_M : Rigidez efectiva total del sistema de aislamiento.

La excentricidad natural se calcula mediante las siguientes fórmulas:

$$e_X = X_{CM} - X_{CR}$$

$$e_Y = Y_{CM} - Y_{CR}$$

A. Balance torsional del sistema LRB+SL. La tabla 41 presenta la posición del centro de masa y rigidez del sistema LRB+SL.

Tabla 41

Centro de masa y rigidez del sistema de aislamiento LRB+SL

Descripción	X (m)	Y (m)
Centro de masa	23.81	12.11
Centro de rigidez	24.00	12.00

De la tabla 41 se puede observar que el centro de masa y rigidez se encuentran muy cerca. Teniendo como excentricidad natural:

$$e_x = -0.19 \text{ m}$$

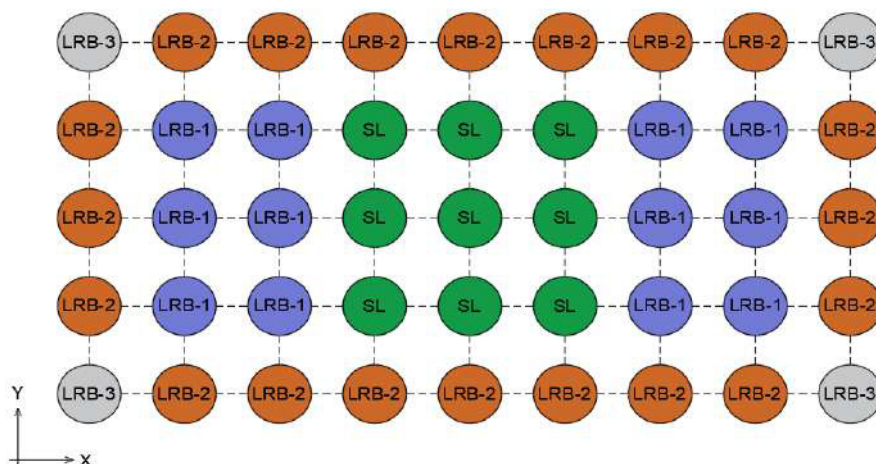
$$e_y = 0.11 \text{ m}$$

Ya que la excentricidad natural es muy baja, se deduce que el sistema de aislamiento está sometido a un muy leve efecto de torsión.

En la figura 41 se muestra la ubicación de los aisladores del sistema LRB+SL, el cual cuenta con los siguientes dispositivos: LRB-1, LRB-2, LRB-3 y SL.

Figura 45

Distribución en planta de los aisladores en el sistema LRB+SL



B. Balance torsional del sistema LRB+HDR+SL. La tabla 42 presenta la posición del centro de masa y rigidez del sistema LRB+HDR+SL.

Tabla 42

Centro de masa y rigidez del sistema de aislamiento LRB+HDR+SL

Descripción	X (m)	Y (m)
Centro de masa	23.81	12.11
Centro de rigidez	24.00	12.00

De la tabla 42 se puede observar que el centro de masa y rigidez se encuentran muy cerca. Teniendo como excentricidad natural:

$$e_x = -0.19 \text{ m}$$

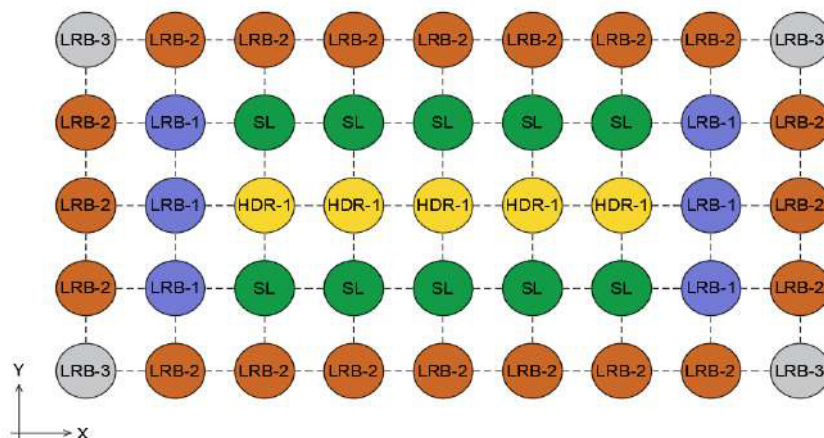
$$e_y = 0.11 \text{ m}$$

Ya que la excentricidad natural es muy baja, se deduce que el sistema de aislamiento está sometido a un muy leve efecto de torsión.

En la figura 42 se muestra la ubicación de los aisladores del sistema LRB+HDR+SL, el cual cuenta con los siguientes dispositivos: LRB-1, LRB-2, LRB-3, HDR-1 y SL.

Figura 46

Distribución en planta de los aisladores en el sistema LRB+HDR+SL



C. Balance torsional del sistema TFP. La tabla 43 presenta la posición del centro de masa y rigidez del sistema TFP.

Tabla 43

Centro de masa y rigidez del sistema de aislamiento TFP

Descripción	X (m)	Y (m)
Centro de masa	23.78	12.10
Centro de rigidez	24.00	12.00

De la tabla 43 se puede observar que el centro de masa y rigidez se encuentran muy cerca. Teniendo como excentricidad natural:

$$e_x = -0.22 \text{ m}$$

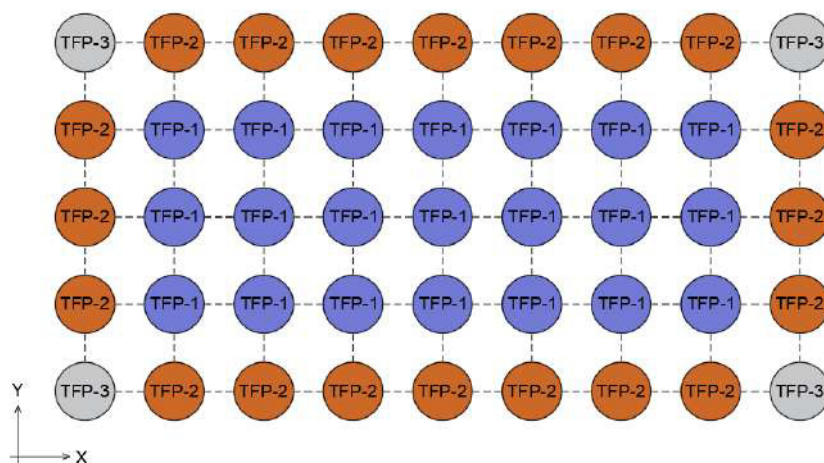
$$e_y = 0.10 \text{ m}$$

Ya que la excentricidad natural es muy baja, se deduce que el sistema de aislamiento está sometido a un muy leve efecto de torsión.

En la figura 43 se muestra la ubicación de los aisladores del sistema TFP, el cual cuenta con los siguientes dispositivos: TFP-1, TFP-2 y TFP-3.

Figura 47

Distribución en planta de los aisladores en el sistema TFP



Etapa 03: Análisis dinámico modal espectral

Este análisis no fue usado para obtener las respuestas estructurales que se buscaron en esta investigación, sin embargo, fue necesario para obtener información usada en el ANLTH.

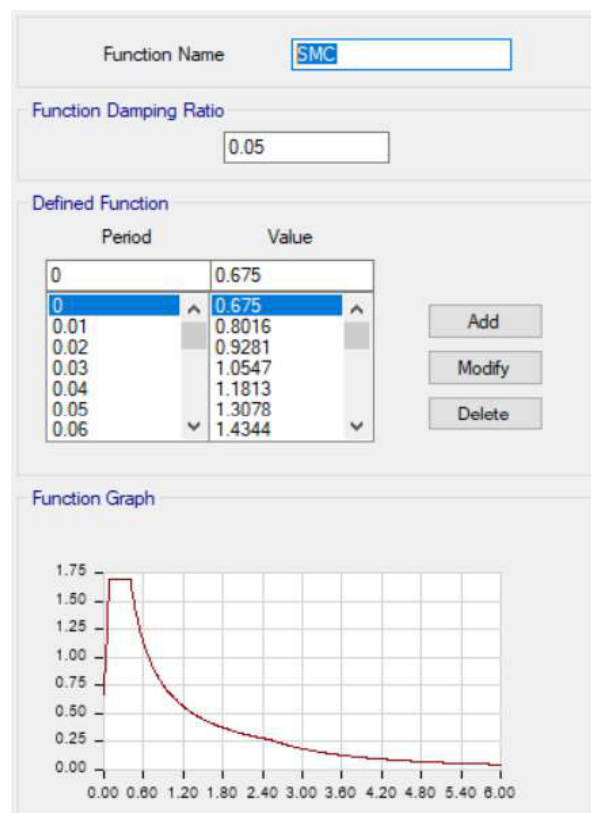
3.6.3.1. Sismo máximo considerado (SMC). Según lo indicado en el artículo 14 de la Norma E.031 (MVCS, 2020) el SMC (espectro objetivo para el ANLTH) se determinó mediante la siguiente fórmula:

$$S_{aM} = 1.5ZUCSg$$

Estos parámetros fueron definidos en la sección 3.6.2.2 de la presente investigación. El SMC fue insertado en el software ETABS versión 22.5.0.

Figura 48

SMC según las Normas E.030 y E.031



3.6.3.2. Modelado numérico para el análisis modal espectral. Fueron ingresados parámetros requeridos en ETABS versión 22.5.0 para obtener los resultados buscados.

Según lo indicado en el artículo 26 de la Norma E.030 (MVCS, 2020), se debe considerar el 50% de la carga viva para edificaciones de categoría A, como es el caso de las edificaciones hospitalarias y 25% de la carga viva en azoteas.

Figura 49

Asignación de peso sísmico

Mass Source Name: Fuentes de Masa

Mass Source

- ☐ Element Self Mass
- ☒ Additional Mass
- ☒ Specified Load Patterns
- ☐ Adjust Diaphragm Lateral Mass to Move Mass Centroid by:
 - This Ratio of Diaphragm Width in X Direction:
 - This Ratio of Diaphragm Width in Y Direction:

Mass Multipliers for Load Patterns

Load Pattern	Multiplier
PP	1
CM	1
CV	0.5
CVr	0.25

Mass Options

- ☒ Include Lateral Mass
- ☒ Include Vertical Mass
- ☐ Lump Lateral Mass at Story Levels

Se consideró una participación del 100% de participación al espectro en la dirección de análisis principal y un 30% al espectro en la otra dirección perpendicular, modificando el factor de escala con 9.81 m/s^2 .

Figura 50

Caso de carga para el análisis modal espectral en la dirección X

General

Load Case Name: RESPONSE SPECTRUM

Load Case Type: Response Spectrum

Mass Source: Previous (Fuentes de Masa)

Analysis Model: Default

Loads Applied

Load Type	Load Name	Function	Scale Factor
Acceleration	U1	Z4S1Ra1	9.8067
Acceleration	U2	Z4S1Ra1	2.942

Other Parameters

Modal Load Case: Modal Eigen

Modal Combination Method: CQC

☐ Include Rigid Response

Earthquake Duration, t_d : SRSS

Directional Combination Type: SRSS

Absolute Directional Combination Scale Factor: Constant at 0.05; Overrides

Modal Damping: 0 for All Diaphragms

Diaphragm Eccentricity: 0 for All Diaphragms

Figura 51

Caso de carga para el análisis modal espectral en la dirección Y

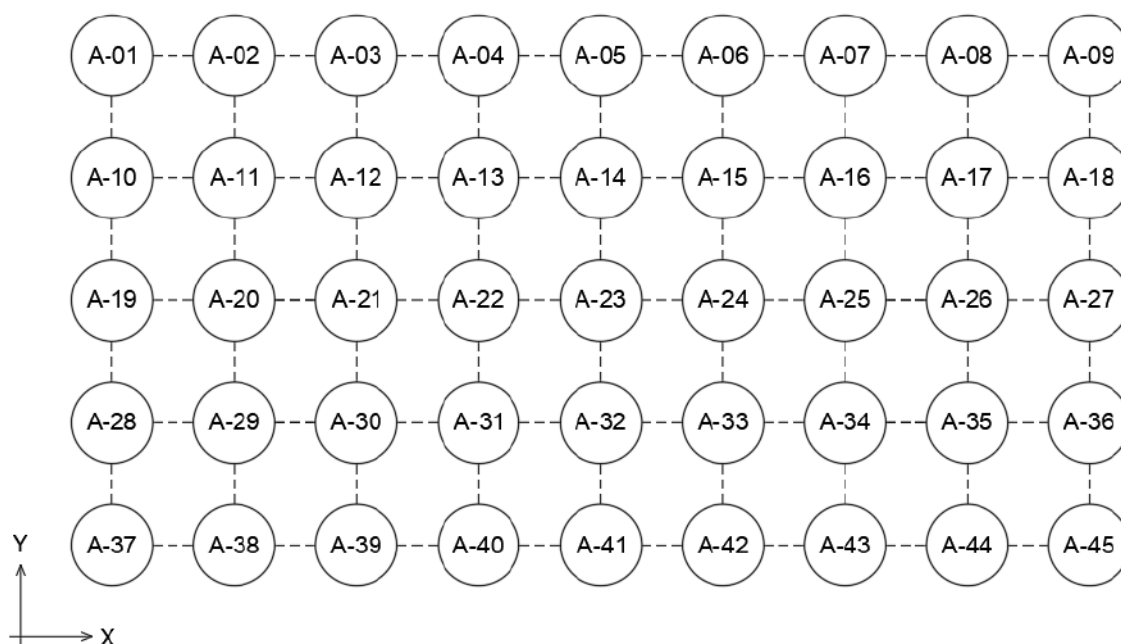
The screenshot shows a software interface for defining a load case. The 'General' section includes fields for 'Load Case Name' (ESPECTRAL Y-Y), 'Load Case Type' (Response Spectrum), 'Mass Source' (Previous: (Fuente de Masa)), and 'Analysis Model' (Default). The 'Loads Applied' section contains a table with two rows of acceleration loads.

Load Type	Load Name	Function	Scale Factor
Acceleration	U2	Z4S1Ra1	9.8067
Acceleration	U1	Z4S1Ra1	2.942

The 'Other Parameters' section includes options for 'Modal Load Case' (Modal Eigen), 'Modal Combination Method' (CQC), 'Include Rigid Response' (unchecked), 'Rigid Frequency' (f1, f2), 'Periodic + Rigid Type', 'Earthquake Duration' (td), 'Directional Combination Type' (SRSS), 'Absolute Directional Combination Scale Factor', 'Modal Damping' (Constant at 0.05), and 'Diaphragm Eccentricity' (0 for All Diaphragms).

3.6.3.3. Verificación de fuerzas de tracción en los aisladores. El artículo 9 de la Norma E.031 (MVCS, 2020) indica que no se permite levantamientos locales en los dispositivos de aislamiento, a menos que estos no conduzcan a sobreesfuerzos o inestabilidad de los aisladores o elementos estructurales. Sin embargo, los aisladores de fricción como es el caso de los dispositivos SL y TFP son especialmente sensibles a estos efectos ya que dependen directamente de la fricción con la superficie de contacto para trabajar correctamente, por ese motivo es importante asegurarse que estos dispositivos no presenten levantamientos locales producto de fuerzas de tracción.

Para realizar estos cálculos se utilizaron las propiedades en límite superior de los aisladores y la combinación de carga vertical mínima indicada en el artículo 12 de la Norma E.031 (MVCS, 2020) y en la tabla 6 de la presente investigación.

Figura 52*Ubicación de los dispositivos de aislamiento***Tabla 44***Cargas verticales mínimas que actúan sobre los aisladores*

Sistema de aislamiento	Carga vertical mínima	Ubicación
LRB+SL	2.21 tonf	A-09
LRB+HDR+SL	2.32 tonf	A-09
TFP	24.35 tonf	A-09

En la tabla 44 se puede observar que los dispositivos que conformaron los tres sistemas de aislamiento no presentaron fuerzas de tracción, ya que las menores cargas verticales producto de la combinación de carga vertical mínima se encuentran en compresión, evitando así levantamientos locales, siendo el sistema TFP el que presentó el mejor comportamiento al obtener una carga mínima en compresión de 24.35 tonf, mucho mayor a la obtenida por los otros dos sistemas de aislamiento.

3.6.3.4. Límites para fuerzas cortantes V_b y desplazamientos D_{TM} . El artículo 26 de la Norma E.031 (MVCS, 2020) indica que la fuerza cortante que actúa en el sistema de aislamiento (V_b) debido al SMC no debe ser menor al 90% de V_b obtenida mediante el análisis estático, mientras que el desplazamiento máximo del sistema de aislamiento (D_{TM}) debido al SMC no debe ser menor al 80% de D_{TM} obtenida mediante el análisis estático.

Tabla 45

Fuerzas y desplazamientos laterales mínimos de los sistemas de aislamiento

Sistema de Aislamiento	Parámetros	Análisis Estático	Análisis modal espectral			
			X		Y	
LRB+SL	V_b (tonf)	998.12	1317.86	132.03% V_b	1318.12	132.06% V_b
	D_{TM} (m)	0.327	0.271	83.00% D_{TM}	0.271	83.10% D_{TM}
LRB+HDR+SL	V_b (tonf)	938.37	1315.34	140.17% V_b	1316.15	140.26% V_b
	D_{TM} (m)	0.321	0.263	81.84% D_{TM}	0.263	81.97% D_{TM}
TFP	V_b (tonf)	1007.79	1079.99	107.16% V_b	1079.52	107.12% V_b
	D_{TM} (m)	0.323	0.280	86.79% D_{TM}	0.283	87.54% D_{TM}

Nota. V_b fue analizada en límite superior y D_{TM} fue analizado en límite inferior.

Etapas 04: Análisis dinámico no lineal tiempo-historia

La Norma E.031 (MVCS, 2020) indica en el artículo 18 que el ANLTH puede ser usado para diseñar cualquier tipo de edificio sísmicamente aislado, no estando sujeto a otras limitaciones.

En cada sistema de aislamiento evaluado, fue necesario desarrollar tres modelos numéricos en el software ETABS versión 22.5.0, cada uno correspondiente a las condiciones nominal, de límite superior e inferior.

3.6.4.1. Elección y procesamiento de los registros sísmicos. Según lo indicado en el artículo 15 de la Norma E.031 (MVCS, 2020), fueron elegidos siete pares de registros sísmicos, cada uno con dos componentes horizontales de aceleración en las direcciones Este-Oeste (EW) y Norte-Sur (NS), obtenidos de la red nacional de acelerógrafos (REDACIS- CISMID).

Tabla 46*Registros sísmicos utilizados*

N°	Ubicación	Fecha	Estación	Suelo	Magnitud	PGA (cm/s ²)		Duración (seg)
						EW	NS	
1	Huacho	17/10/1966	PRQ	Rígido	8.1 Mw	180.56	268.24	65.64
2	Huaraz	30/05/1970	PRQ	Rígido	6.6 Mb	105.05	97.81	45.08
3	Cañete	03/10/1974	PRQ	Rígido	6.6 Mb	194.21	180.09	97.96
4	Ilo	07/07/2001	TAC001	Rígido	6.5 Mb	35.93	40.42	128.67
5	Tacna	05/05/2010	TAC001	Rígido	6.5 ML	154.00	190.00	118.00
6	Iquique 1	01/04/2014	TAC001	Rígido	8.2 Mw	72.49	69.51	152.21
7	Iquique 2	02/04/2014	TAC001	Rígido	7.4 Mw	32.59	17.09	150.00

Se usaron las estaciones acelerométricas del Parque de la reserva (PRQ) ubicada en Lima, y de la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann (TAC001) ubicada en Tacna, ambas emplazadas sobre suelo rígido.

En las figuras 49 y 50 se muestran las dos componentes horizontales de aceleración del registro original del sismo Iquique 1, ocurrido el primero de abril del año 2014 en Chile, y es presentado como ejemplo del procedimiento realizado.

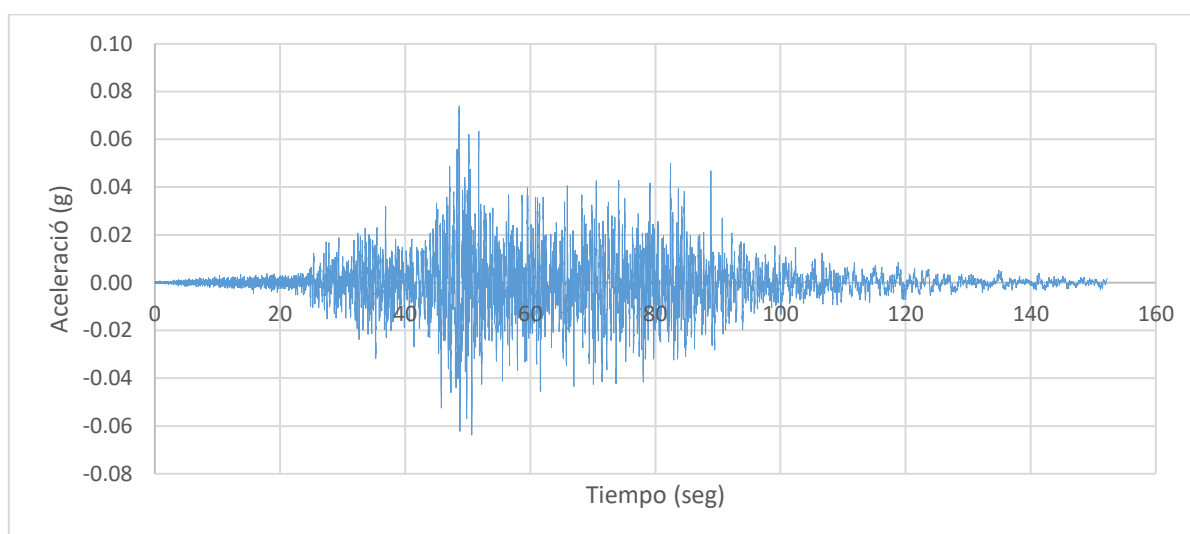
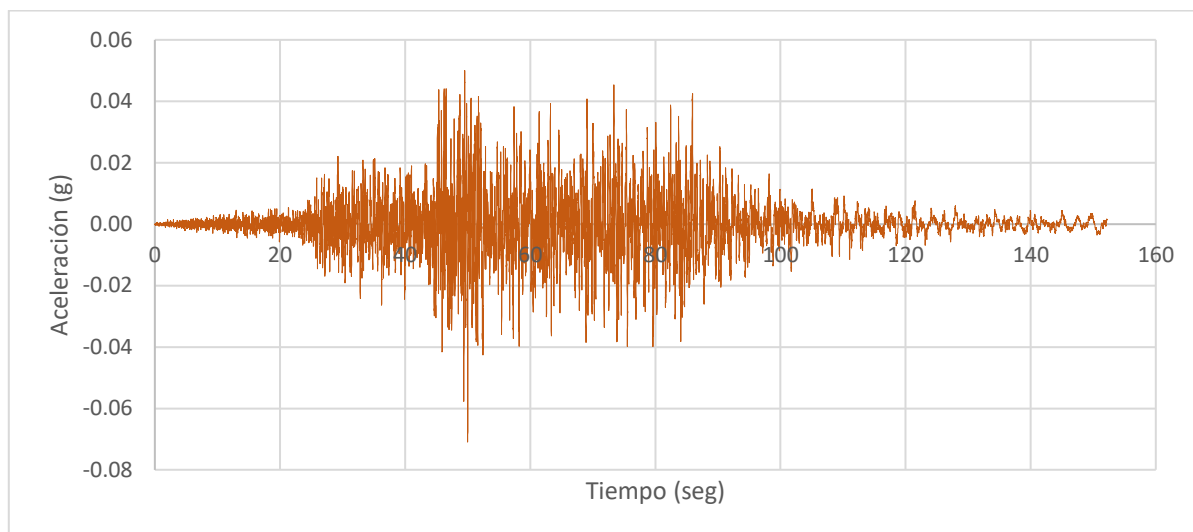
Figura 53*Registro original de aceleraciones del sismo Iquique 1 en la dirección EW*

Figura 54

Registro original de aceleraciones del sismo Iquique 1 en la dirección NS



Se realizó la corrección de línea base y filtrado de frecuencias mediante el uso del software SeismoSignal v2025.

Figura 55

Registro de aceleración, velocidad y desplazamiento del sismo Iquique 1 en la dirección Este-Oeste, corregido y filtrado

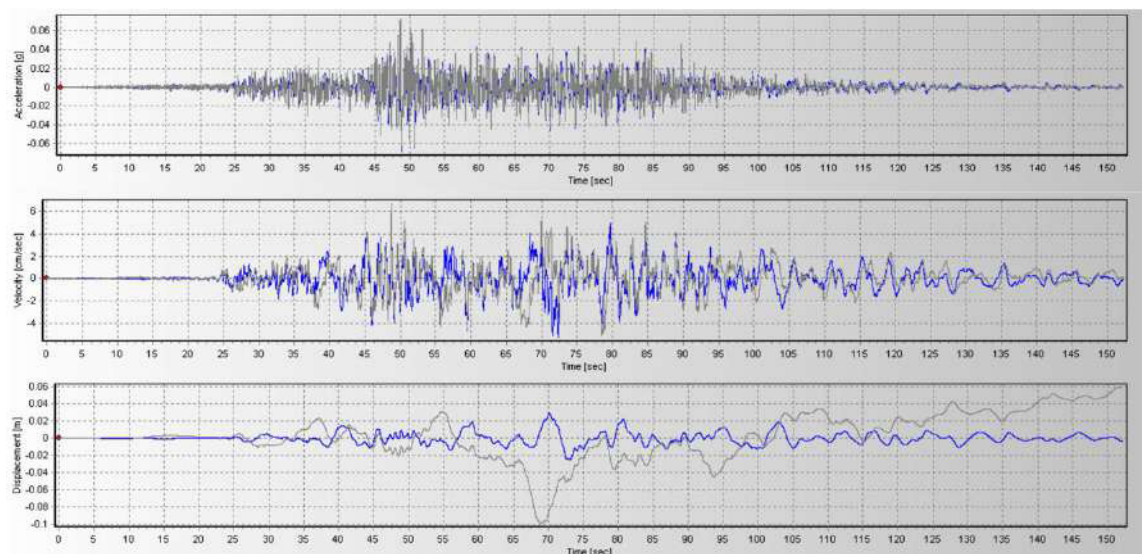
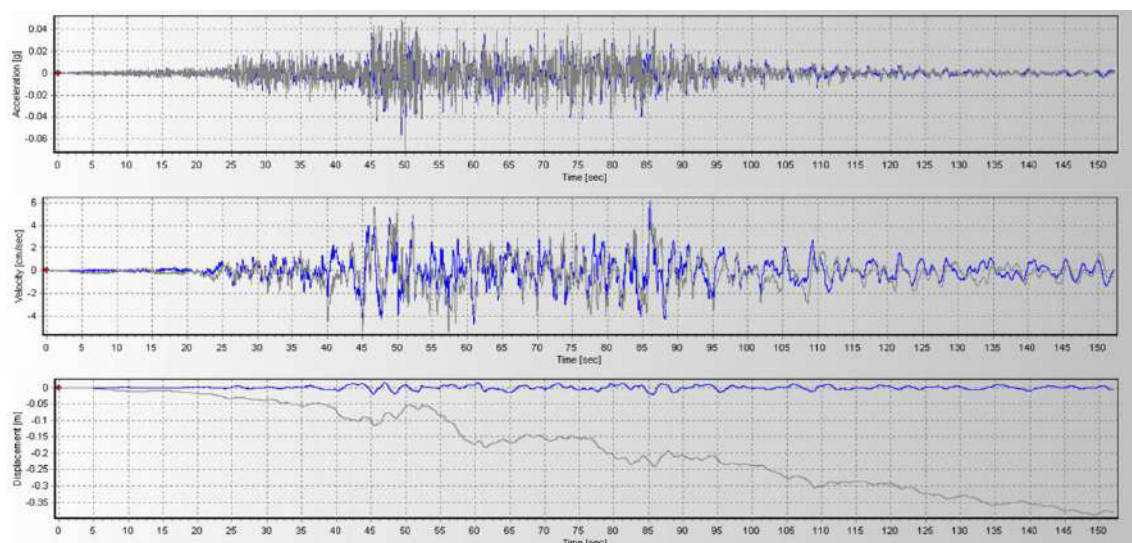


Figura 56

Registro de aceleración, velocidad y desplazamiento del sismo Iquique 1 en la dirección Norte-Sur, corregido y filtrado



Se escaló el espectro del sismo Iquique 1 (corregido y filtrado) al espectro objetivo o SMC mediante el uso del software SeismoMatch v2025. Cada par de registro fue escalado en el rango de periodos $0.20T_M$ calculado usando las propiedades en límite superior y $1.25T_M$ usando las propiedades en límite inferior.

Figura 57

Espectro del sismo Iquique 1 en la dirección EW escalado al SMC

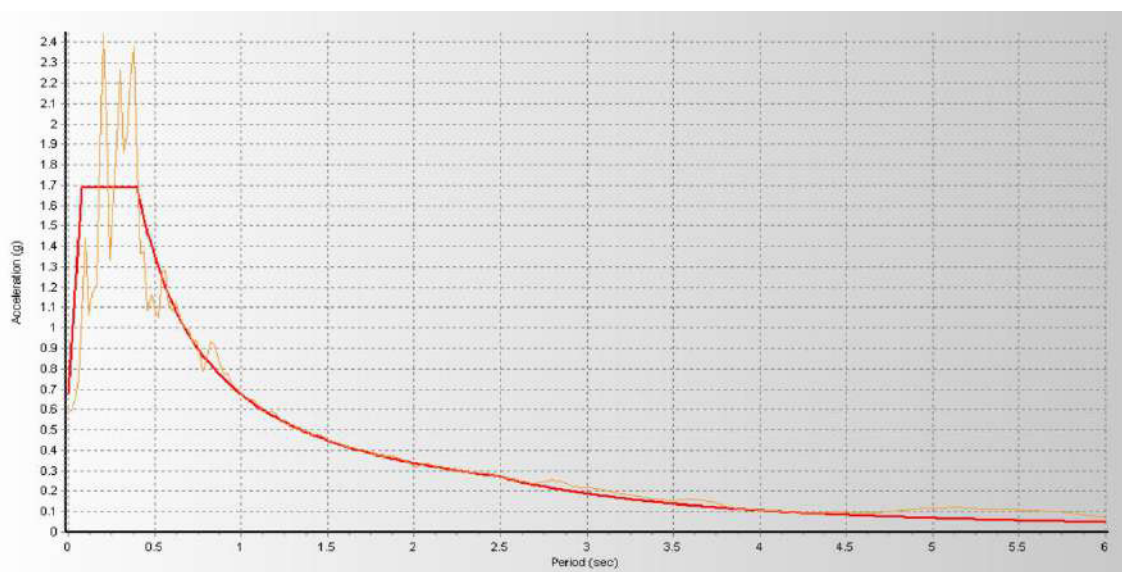
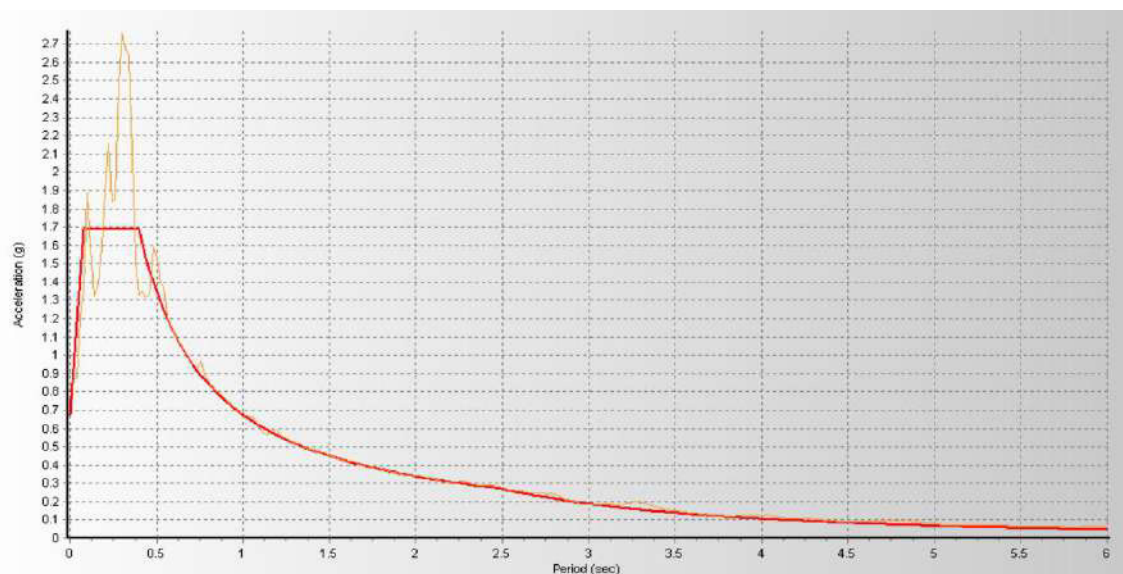


Figura 58

Espectro del sismo Iquique 1 en la dirección NS escalado al SMC



Se obtuvo finalmente el registro corregido, filtrado y escalado tal como se muestra en las figuras 55 y 56, los cuales fueron usados en los modelos numéricos en el software ETABS versión 22.5.0.

Figura 59

Registro del sismo Iquique 1 en la dirección EW escalado al SMC

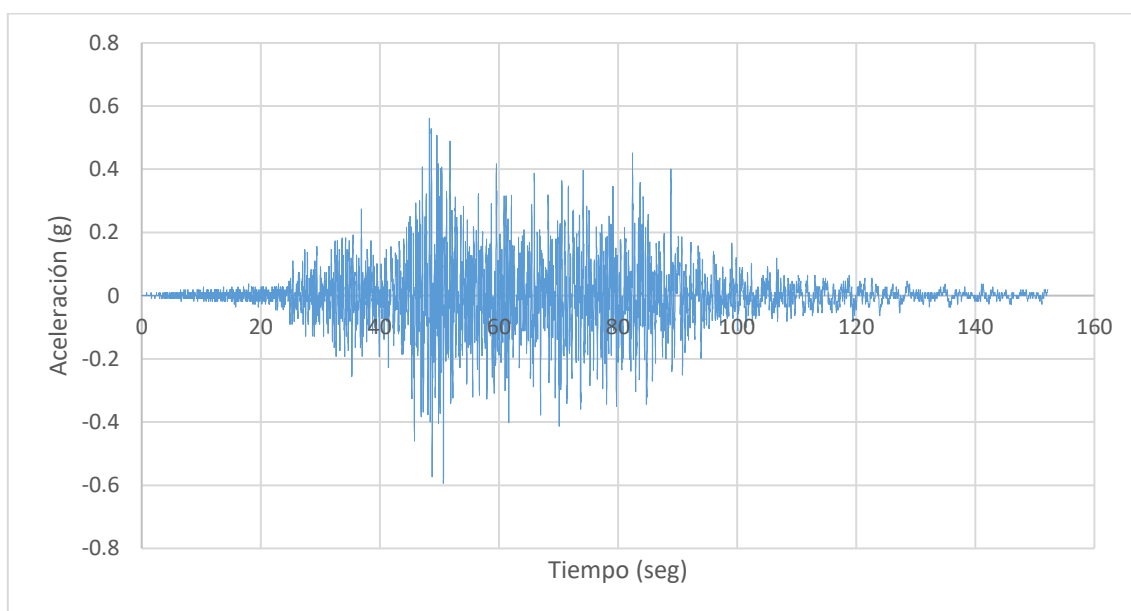
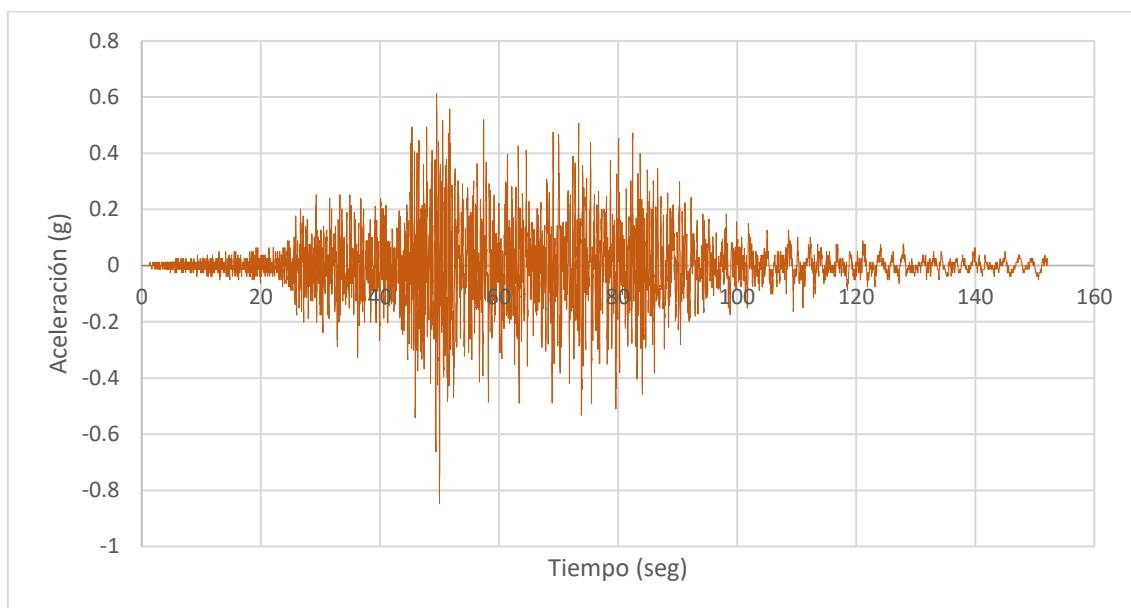


Figura 60

Registro del sismo Iquique 1 en la dirección NS escalado al SMC



3.6.4.2. Modelamiento numérico para el análisis tiempo-historia. Se hicieron modelos numéricos en el software ETABS versión 22.5.0 para las condiciones nominales, de límite superior e inferior.

Se procedió a definir una función tiempo-historia tipo rampa y luego un caso de carga utilizando el FNA (Fast Nonlinear Analysis) que incluyó la función tipo rampa, considerando además un amortiguamiento del 99.99% en todos los modos de vibración con el objetivo de evitar que el edificio permanezca vibrando verticalmente (Melendrez y Pantoja, 2020).

Figura 61

Función tiempo-historia tipo rampa

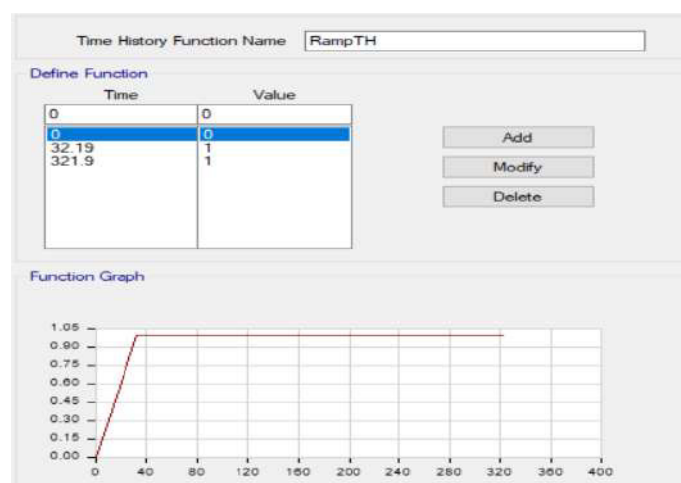


Figura 62

Caso de carga de gravedad con la función tiempo-historia tipo rampa

The screenshot shows the 'General' tab of the ETABS software interface. The 'Load Case Name' is 'Peso TH'. The 'Load Case Type/Subtype' is 'Time History' and 'Nonlinear Modal (FNA)'. The 'Mass Source' is 'Previous (Fuente de Masa)' and the 'Analysis Model' is 'Default'. The 'Initial Conditions' section has 'Zero Initial Conditions - Start from Unstressed State' selected. The 'Loads Applied' table lists four load patterns: PP, CM, CV, and CVr, all using the 'RampTH' function with scale factors of 1, 1, 0.5, and 0.25 respectively. The 'Other Parameters' section shows 'Modal Load Case' as 'Modal Ritz', 'Number of Output Time Steps' as 16095, 'Output Time Step Size' as 0.02 sec, 'Modal Damping' as 'Constant at 0.999', and 'Nonlinear Parameters' as 'Default'.

Load Type	Load Name	Function	Scale Factor
Load Pattern	PP	RampTH	1
Load Pattern	CM	RampTH	1
Load Pattern	CV	RampTH	0.5
Load Pattern	CVr	RampTH	0.25

Se procedió a definir los registros ya procesados como una función tiempo historia en el software ETABS versión 22.5.0.

Figura 63

Registro Iquique 1 en la dirección EW

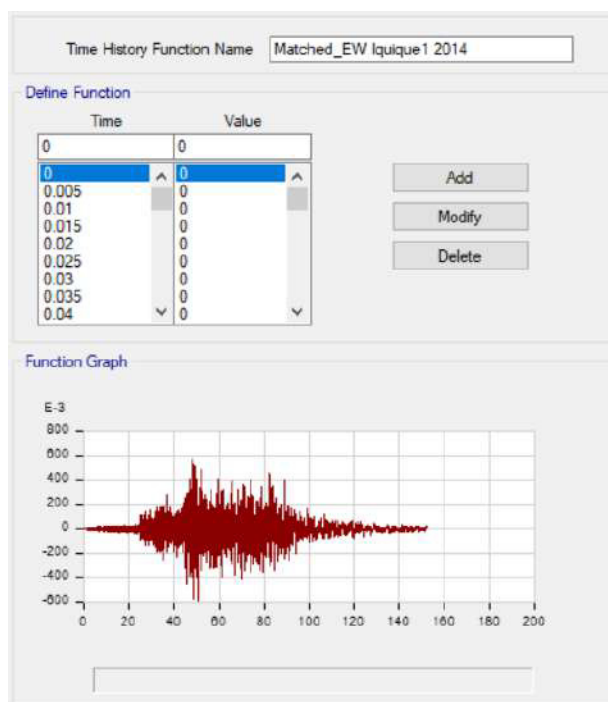
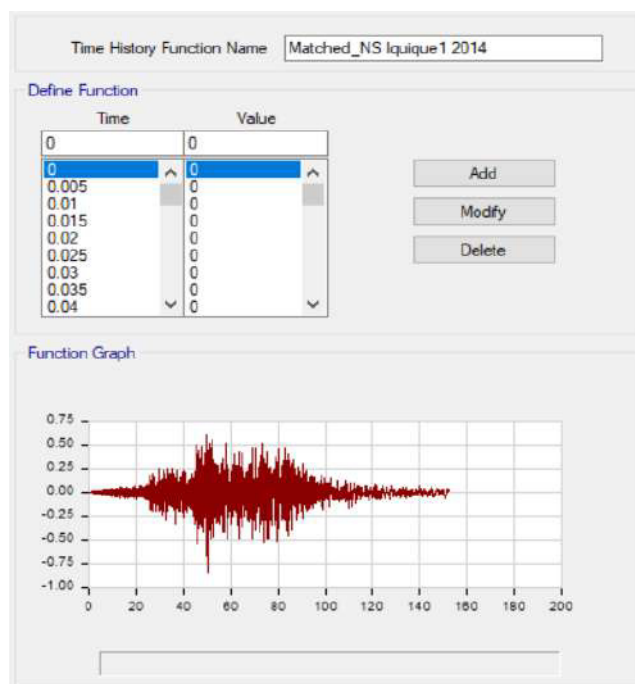


Figura 64*Registro Iquique 1 en la dirección NS*

Según el artículo 15 de la Norma E.031 (MVCS, 2020), se le asignó un 90% de participación al espectro en la dirección de análisis principal y un 44% al espectro en la otra dirección perpendicular, modificando el factor de escala con la aceleración de la gravedad (9.81 m/s^2). Lo anterior fue considerado como caso de carga para cada registro sísmico y en las dos direcciones de análisis, utilizando también el FNA.

Figura 65*Caso de carga para el sismo Iquique 1 en la dirección EW*

General

Load Case Name: Iquique1 2014 EW

Load Case Type/Subtype: Time History / Nonlinear Modal (FNA)

Mass Source: Previous (Fuente de Masa)

Analysis Model: Default

Buttons: Design..., Notes...

Initial Conditions

☐ Zero Initial Conditions - Start from Unstressed State

☒ Continue from State at End of Nonlinear Case (Loads at End of Case ARE Included)

Nonlinear Case: Peso TH

Loads Applied

Load Type	Load Name	Function	Scale Factor
Acceleration	U1	Matched_EW Iquiqu...	8.829
Acceleration	U2	Matched_NS Iquiqu...	4.3164

Buttons: Add, Delete

☐ Advanced

Figura 66

Caso de carga para el sismo Iquique 1 en la dirección NS

The screenshot shows the 'General' and 'Initial Conditions' tabs of the ETABS software interface. The 'General' tab is active, showing the following settings:

- Load Case Name:** Iquique 1 2014 NS
- Load Case Type/Subtype:** Time History (selected) / Nonlinear Modal (FNA) (selected)
- Mass Source:** Previous (Fuente de Masa)
- Analysis Model:** Default

The 'Initial Conditions' tab is also visible, showing the following settings:

- Initial Conditions:**
 - ☐ Zero Initial Conditions - Start from Unstressed State
 - ☒ Continue from State at End of Nonlinear Case (Loads at End of Case ARE included)
- Nonlinear Case:** Peso TH

The 'Loads Applied' section shows a table with the following data:

Load Type	Load Name	Function	Scale Factor
Acceleration	U2	Matched_NS Iquiqu...	8.829
Acceleration	U1	Matched_EW Iquiqu...	4.3164

Buttons for 'Add', 'Delete', and 'Advanced' are also visible.

Se procedió a calcular los parámetros no lineales de los dispositivos de aislamiento para las condiciones nominales, de límite inferior y de límite superior (véase Anexo C), los cuales fueron modelados en el software ETABS versión 22.5.0 como elementos tipo link. En las figuras 63, 64, 65 y 66 se muestran los parámetros no lineales de algunos dispositivos en límite superior.

Figura 67

Parámetros no lineales del dispositivo LRB 1 del sistema LRB+SL

The screenshot shows the 'Identification' and 'Linear Properties' tabs of the ETABS software interface. The 'Identification' tab is active, showing the following settings:

- Property Name:** LRB1
- Direction:** U2
- Type:** Rubber Isolator
- NonLinear:** Yes

The 'Linear Properties' tab is also visible, showing the following settings:

- Effective Stiffness:** 130.015 tonf/m
- Effective Damping:** 14.503 tonf-s/m

The 'Shear Deformation Location' section shows the following setting:

- Distance from End-J:** 1 m

The 'Nonlinear Properties' section shows the following settings:

- Stiffness:** 1232.589 tonf/m
- Yield Strength:** 10.3686 tonf
- Post Yield Stiffness Ratio:** 0.077

Figura 68

Parámetros no lineales del dispositivo SL del sistema LRB+SL

Identification	
Property Name	SL
Direction	U2
Type	Friction Isolator
NonLinear	Yes

Linear Properties	
Effective Stiffness	86.707 tonf/m
Effective Damping	59.878 tonf-s/m

Shear Deformation Location	
Distance from End-J	1 m

Nonlinear Properties	
Stiffness	23575.838 tonf/m
Friction Coefficient, Slow	0.08
Friction Coefficient, Fast	0.08
Rate Parameter	1 sec/m
Net Pendulum Radius	1000 m

Figura 69

Parámetros no lineales del dispositivo HDR 1 del sistema LRB+HDR+SL

Identification	
Property Name	HDR1
Direction	U2
Type	Rubber Isolator
NonLinear	Yes

Linear Properties	
Effective Stiffness	172.957 tonf/m
Effective Damping	22.619 tonf-s/m

Shear Deformation Location	
Distance from End-J	1 m

Nonlinear Properties	
Stiffness	1012.102 tonf/m
Yield Strength	18.1142 tonf
Post Yield Stiffness Ratio	0.1

Figura 70

Parámetros no lineales del dispositivo TFP 2 del sistema TFP

Identification	
Property Name: TFP2	Type: Triple Pendulum Isolator
Direction: U2; U3	NonLinear: Yes
Linear Properties	
Effective Stiffness - U2: 124.1 tonf/m	Effective Stiffness - U3: 124.1 tonf/m
Effective Damping - U2: 27.857 tonf-s/m	Effective Damping - U3: 27.857 tonf-s/m
Shear Deformation Location	
Distance from End-J - U2: 1 m	Distance from End-J - U3: 1 m
Height and Symmetry of Sliding Surfaces	
Height for Outer Surfaces: 0.21 m	☒ Outer Bottom Surface is Symmetric to Outer Top Surface
Height for Inner Surfaces: 0.15 m	☒ Inner Bottom Surface is Symmetric to Inner Top Surface
Nonlinear Properties for Directions U2 and U3	
	Outer Top Outer Bottom Inner Top Inner Bottom
Stiffness	1671.091 1671.091 835.546 835.546 tonf/m
Friction Coefficient, Slow	0.128 0.128 0.064 0.064
Friction Coefficient, Fast	0.128 0.128 0.064 0.064
Rate Parameter	1 1 1 1 sec/m
Radius of Sliding Surface	1.6 1.6 0.2 0.2 m
Stop Distance	0.127 0.127 0.008 0.008 m

3.6.4.3. Límites para fuerzas cortantes V_b y V_s . El artículo 26 de la Norma E.031 (MVCS, 2020) indica que para el análisis tiempo-historia en estructuras regulares, las fuerzas laterales en elementos estructurales sobre el sistema de aislamiento deben limitarse a que la fuerza cortante que actúa en el sistema de aislamiento (V_b) no debe ser menor al 80% de V_b obtenida mediante el análisis estático, mientras que la fuerza cortante en la base de la superestructura aislada (V_s) no debe ser menor al 100% de V_s obtenida mediante el análisis estático.

Tabla 47

Fuerzas laterales mínimas para los sistemas de aislamiento

Sistema de Aislamiento	Fuerza Cortante	Análisis Estático	Análisis no lineal tiempo-historia			
			X		Y	
LRB+SL	V_b (tonf)	998.12	952.37	95.42% V_b	1011.04	101.30% V_b
	V_s (tonf)	913.16	935.65	102.46% V_s	985.68	107.94% V_s
LRB+HDR	V_b (tonf)	938.37	957.65	102.05% V_b	1028.32	109.59% V_b
	V_s (tonf)	864.09	943.99	109.25% V_s	974.94	112.83% V_s
TFP	V_b (tonf)	1007.79	938.09	93.08% V_b	1005.46	99.77% V_b
	V_s (tonf)	924.12	925.97	100.20% V_s	962.66	104.17% V_s

Nota. V_b y V_s fueron analizadas en límite superior.

3.7. Análisis de datos

Se efectuó mediante estadística descriptiva, la cual fue aplicada a cada indicador de la variable dependiente, donde los resultados encontrados fueron representados mediante tabulaciones, diagramas de dispersión e histogramas.

IV. RESULTADOS

Fueron obtenidos mediante el análisis dinámico no lineal tiempo-historia para los tres sistemas de aislamiento sísmico evaluados, determinados para los siete pares de registros sísmicos y su promedio en las direcciones de análisis X e Y, tal cual se indica en el artículo 25 de la Norma E.031 (MVCS, 2020).

Derivas de entrepiso

Las máximas derivas de entrepiso fueron determinadas considerando las propiedades de límite superior.

La Norma E.031 (MVCS, 2020) indica que las máximas derivas de entrepiso determinadas mediante el ANLTH no deben ser mayores a 0.005, sin embargo, en el capítulo 5 del manual técnico HAZUS-MH MR4 (FEMA, 2003) se indica que las máximas derivas de entrepiso no deben ser mayores a 0.0033, siendo este último más exigente.

A continuación, se muestran las máximas derivas de entrepiso de la superestructura obtenidas al usar el sistema LRB+SL para cada registro de aceleración.

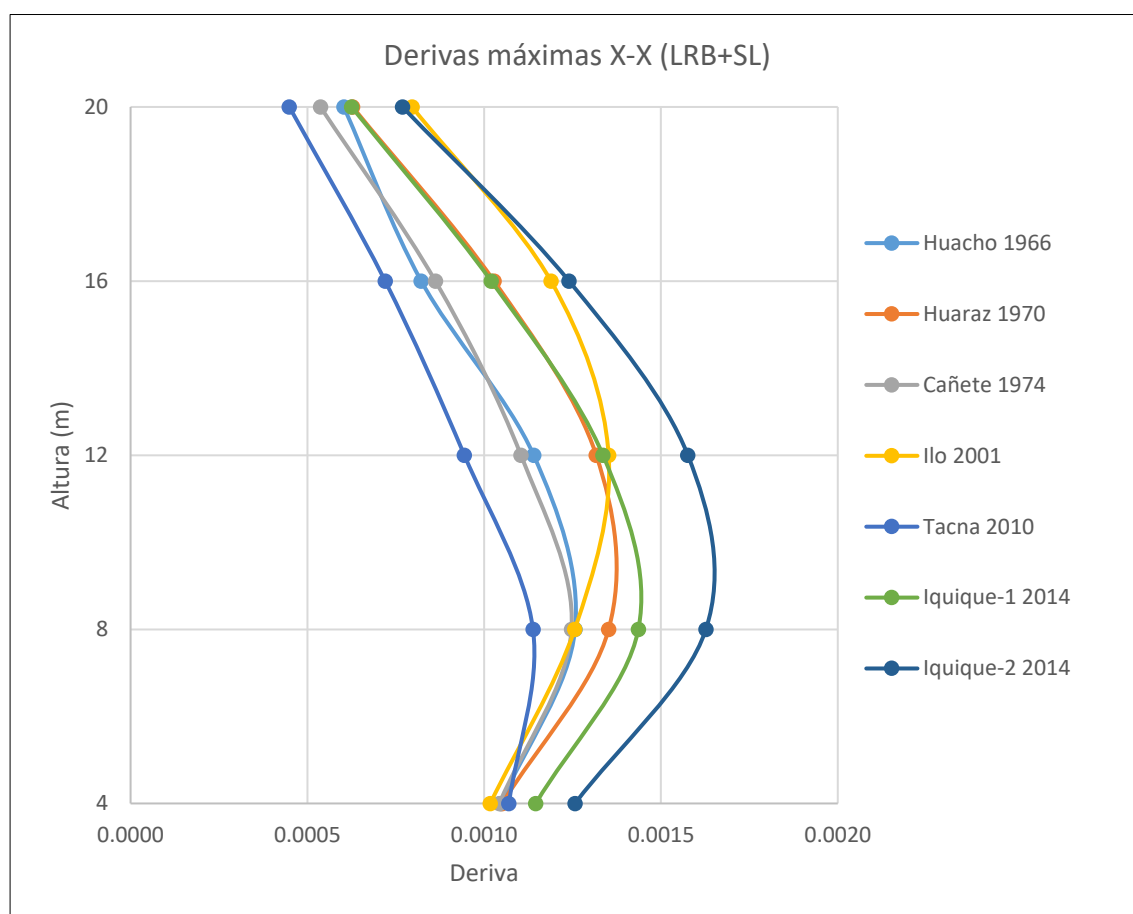
Tabla 48

Máximas derivas de entrepiso para el sistema LRB+SL en el eje X

Derivas Máximas X-X (LRB+SL)							
Nivel	Huacho 1966	Huaraz 1970	Cañete 1974	Ilo 2001	Tacna 2010	Iquique 1 2014	Iquique 2 2014
5	0.000603	0.000628	0.000537	0.000796	0.000449	0.000625	0.000769
4	0.000822	0.001028	0.000862	0.001189	0.000720	0.001020	0.001240
3	0.001140	0.001317	0.001104	0.001352	0.000944	0.001336	0.001576
2	0.001257	0.001352	0.001247	0.001256	0.001138	0.001436	0.001627
1	0.001047	0.001051	0.001043	0.001017	0.001070	0.001146	0.001257

Figura 71

Máximas derivas de entrepiso para el sistema LRB+SL en el eje X

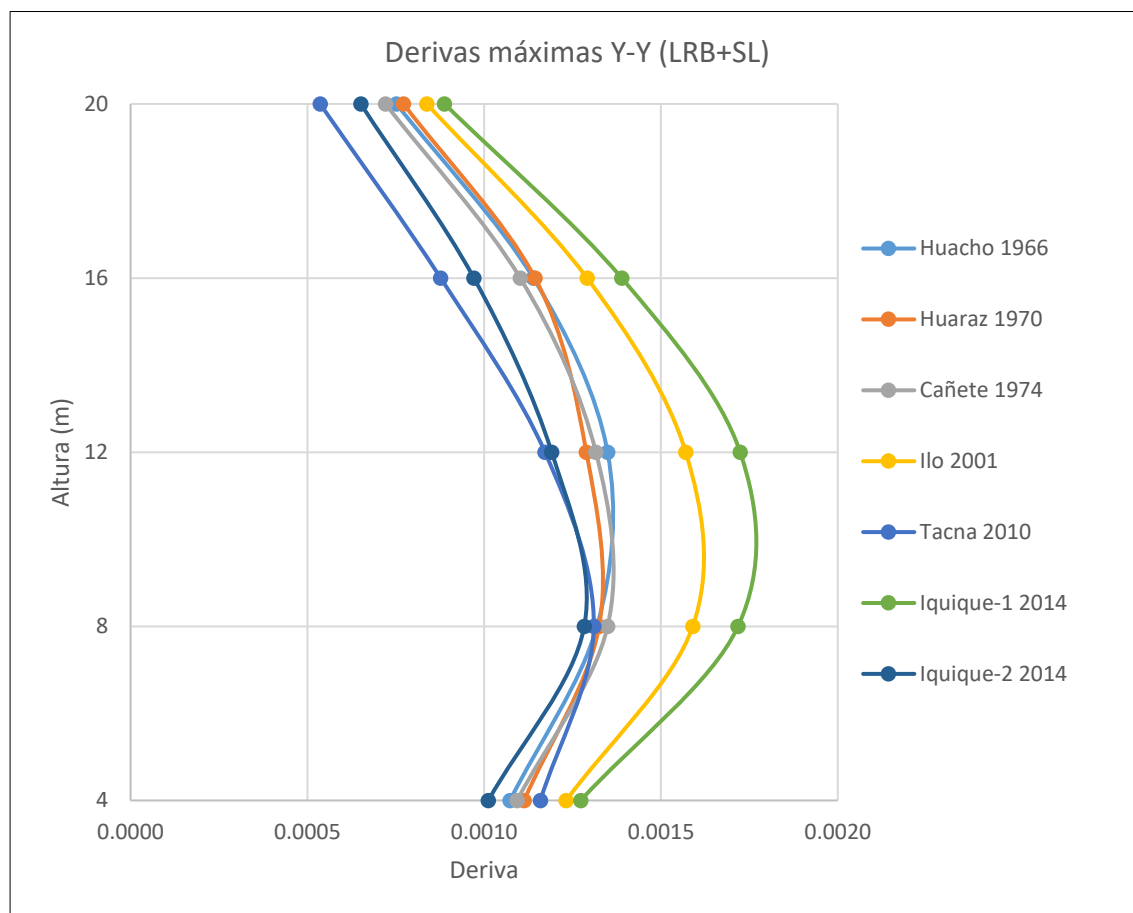
**Tabla 49**

Máximas derivas de entrepiso para el sistema LRB+SL en el eje Y

Derivas Máximas Y-Y (LRB+SL)							
Nivel	Huacho 1966	Huaraz 1970	Cañete 1974	Ilo 2001	Tacna 2010	Iquique 1 2014	Iquique 2 2014
5	0.000752	0.000772	0.000721	0.000838	0.000536	0.000888	0.000651
4	0.001139	0.001144	0.001102	0.001291	0.000877	0.001389	0.000971
3	0.001349	0.001289	0.001316	0.001570	0.001172	0.001724	0.001191
2	0.001319	0.001325	0.001349	0.001590	0.001310	0.001718	0.001283
1	0.001073	0.001113	0.001093	0.001232	0.001159	0.001273	0.001012

Figura 72

Máximas derivas de entrepiso para el sistema LRB+SL en el eje Y



A continuación, se muestran las máximas derivas de entrepiso de la superestructura obtenidas al usar el sistema LRB+HDR+SL para cada registro de aceleración.

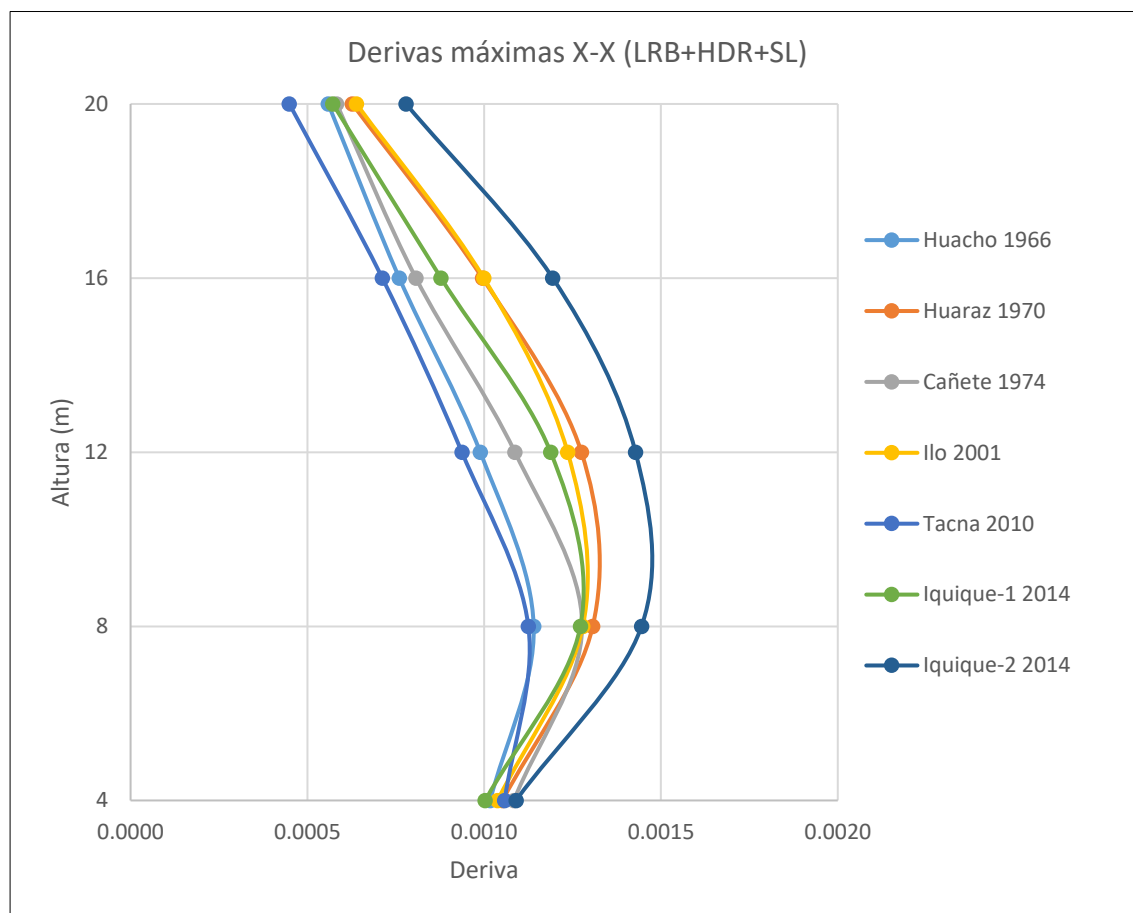
Tabla 50

Máximas derivas de entrepiso para el sistema LRB+HDR+SL en el eje X

Derivas Máximas X-X (LRB+HDR+SL)							
Nivel	Huacho 1966	Huaraz 1970	Cañete 1974	Ilo 2001	Tacna 2010	Iquique 1 2014	Iquique 2 2014
5	0.000559	0.000627	0.000583	0.000639	0.000449	0.000572	0.000779
4	0.000760	0.000995	0.000807	0.000999	0.000712	0.000878	0.001194
3	0.000989	0.001275	0.001087	0.001236	0.000937	0.001188	0.001428
2	0.001140	0.001307	0.001277	0.001279	0.001125	0.001272	0.001445
1	0.001017	0.001052	0.001084	0.001038	0.001058	0.001003	0.001090

Figura 73

Máximas derivas de entrepiso para el sistema LRB+HDR+SL en el eje X

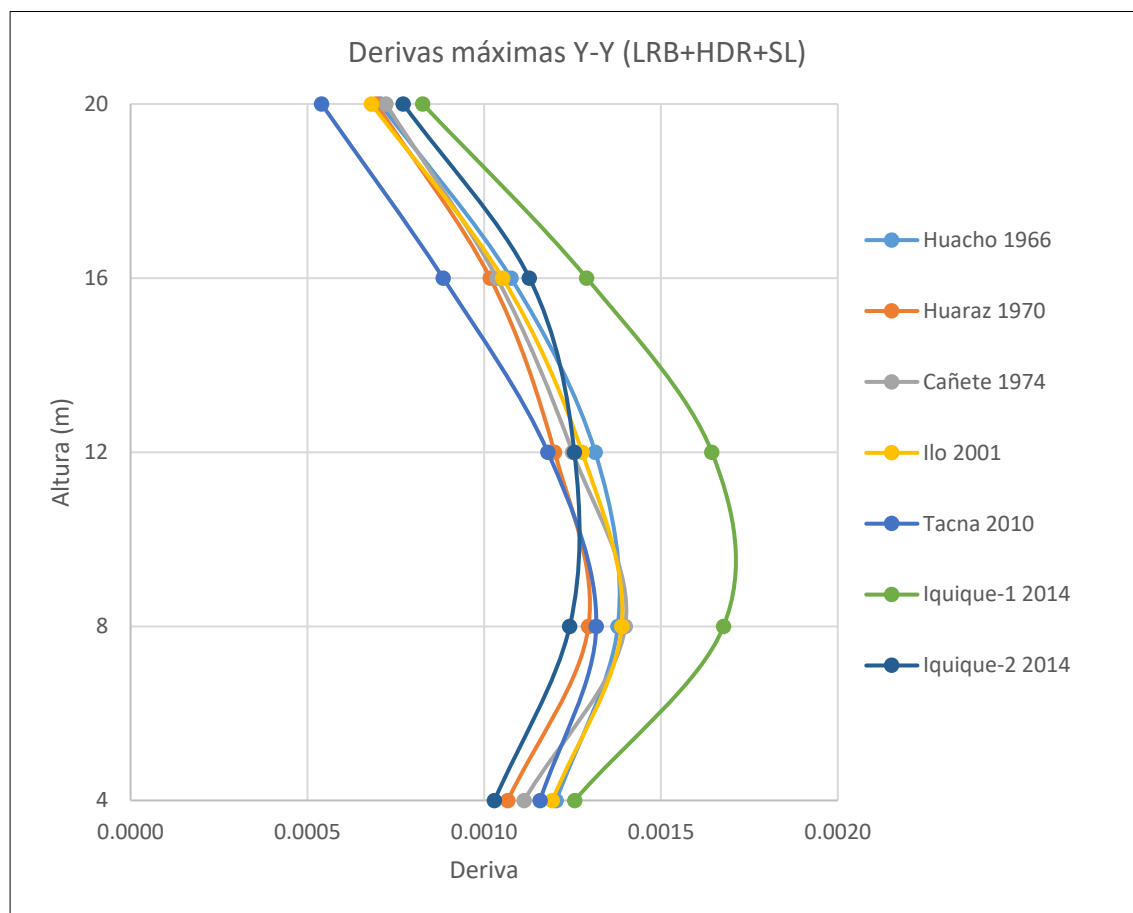
**Tabla 51**

Máximas derivas de entrepiso para el sistema LRB+HDR+SL en el eje Y

Derivas Máximas Y-Y (LRB+HDR+SL)							
Nivel	Huacho 1966	Huaraz 1970	Cañete 1974	Ilo 2001	Tacna 2010	Iquique 1 2014	Iquique 2 2014
5	0.000706	0.000695	0.000722	0.000681	0.000540	0.000826	0.000771
4	0.001076	0.001017	0.001036	0.001052	0.000884	0.001290	0.001128
3	0.001314	0.001199	0.001250	0.001277	0.001180	0.001644	0.001255
2	0.001378	0.001295	0.001399	0.001389	0.001317	0.001677	0.001242
1	0.001204	0.001067	0.001113	0.001193	0.001158	0.001256	0.001029

Figura 74

Máximas derivas de entrepiso para el sistema LRB+HDR+SL en el eje Y



A continuación, se muestran las máximas derivas de entrepiso de la superestructura obtenidas al usar el sistema TFP para cada registro de aceleración.

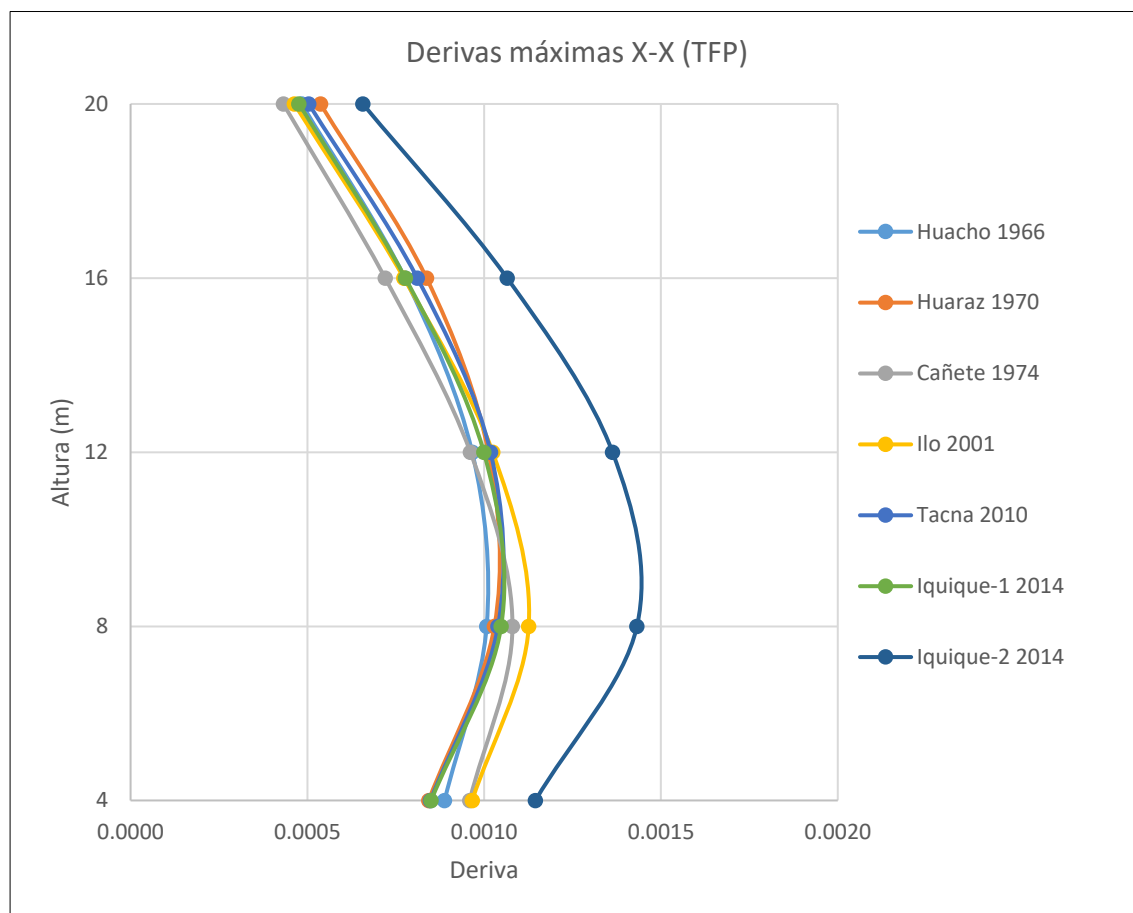
Tabla 52

Máximas derivas de entrepiso para el sistema TFP en el eje X

Derivas Máximas X-X (TFP)							
Nivel	Huacho 1966	Huaraz 1970	Cañete 1974	Ilo 2001	Tacna 2010	Iquique 1 2014	Iquique 2 2014
5	0.000484	0.000537	0.000432	0.000463	0.000504	0.000476	0.000657
4	0.000776	0.000837	0.000720	0.000773	0.000811	0.000777	0.001065
3	0.000966	0.001012	0.000961	0.001024	0.001018	0.000999	0.001363
2	0.001007	0.001029	0.001080	0.001126	0.001039	0.001048	0.001432
1	0.000888	0.000843	0.000959	0.000966	0.000848	0.000850	0.001145

Figura 75

Máximas derivas de entrepiso para el sistema TFP en el eje X

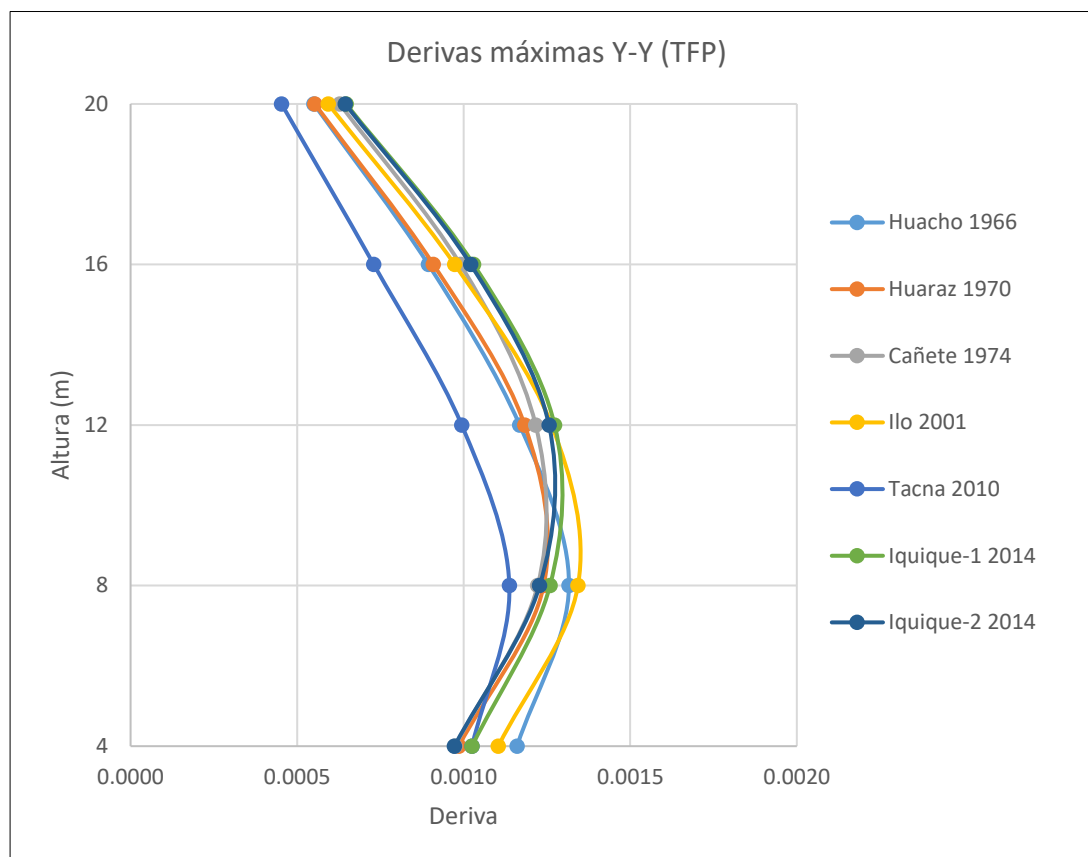
**Tabla 53**

Máximas derivas de entrepiso para el sistema TFP en el eje Y

Derivas Máximas Y-Y (TFP)							
Nivel	Huacho 1966	Huaraz 1970	Cañete 1974	Ilo 2001	Tacna 2010	Iquique 1 2014	Iquique 2 2014
5	0.000550	0.000553	0.000628	0.000593	0.000453	0.000647	0.000644
4	0.000894	0.000909	0.000990	0.000973	0.000730	0.001030	0.001021
3	0.001168	0.001183	0.001216	0.001264	0.000994	0.001273	0.001256
2	0.001316	0.001240	0.001222	0.001343	0.001137	0.001259	0.001228
1	0.001160	0.000985	0.000974	0.001104	0.001025	0.001025	0.000972

Figura 76

Máximas derivas de entrepiso para el sistema TFP en el eje Y



A continuación, se muestra el promedio de las máximas derivas de entrepiso de los siete pares de registros de aceleración utilizados en la superestructura para los tres sistemas de aislamiento.

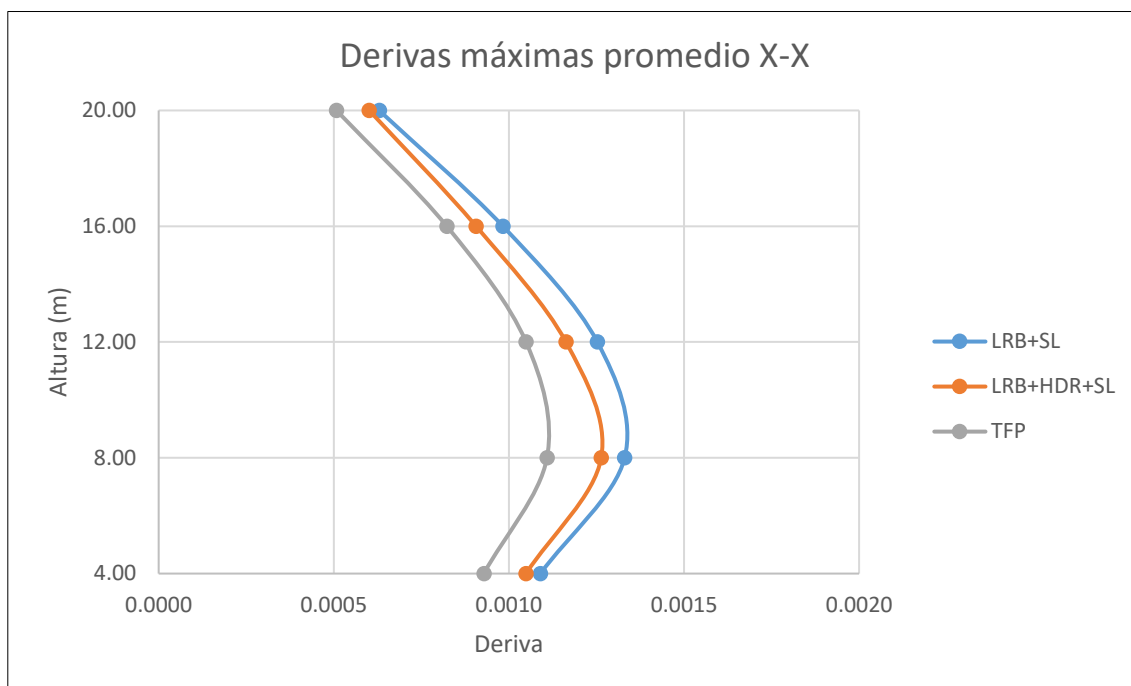
Tabla 54

Derivas máximas promedio para los tres sistemas de aislamiento

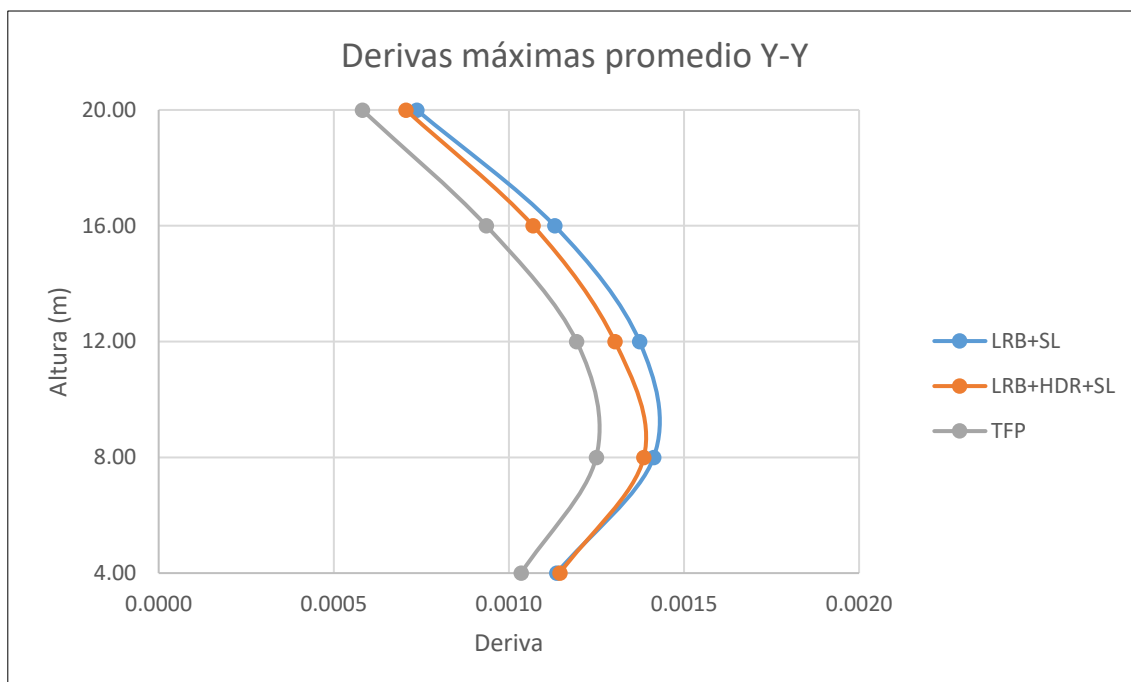
Nivel	Altura (m)	Derivas máximas promedio					
		LRB+SL		LRB+HDR+SL		TFP	
		X-X	Y-Y	X-X	Y-Y	X-X	Y-Y
5	20.00	0.000630	0.000737	0.000601	0.000706	0.000508	0.000581
4	16.00	0.000983	0.001130	0.000906	0.001069	0.000823	0.000935
3	12.00	0.001253	0.001373	0.001163	0.001303	0.001049	0.001193
2	8.00	0.001330	0.001413	0.001264	0.001385	0.001109	0.001249
1	4.00	0.001090	0.001136	0.001049	0.001146	0.000928	0.001035

Figura 77

Derivas máximas promedio de los tres sistemas de aislamiento en el eje X

**Figura 78**

Derivas máximas promedio de los tres sistemas de aislamiento en el eje Y



Se puede observar en las figuras 73 y 74 que ninguna de las derivas máximas promedio de entrepiso de los tres sistemas de aislamiento supera el límite de 0.0033 indicado en el

capítulo 5 del manual técnico HAZUS-MH MR4 (FEMA, 2003, p. 45) y menos aún el límite de 0.005 indicado en la Norma E.031 (MVCS, 2020c, p. 34).

Como se observa en la tabla 54, la máxima deriva promedio de entrepiso del sistema LRB+SL fue de 0.001330 en el eje X y de 0.001413 en el eje Y, para el caso del sistema LRB+HDR+SL fue de 0.001264 en el eje X y de 0.001385 en el eje Y, por último, para el caso del sistema TFP fue de 0.001109 en el eje X y de 0.001249 en el eje Y.

Se concluyó que el sistema TFP fue el que presentó las menores derivas de entrepiso para ambas direcciones de análisis X e Y.

Aceleraciones de piso

Las máximas aceleraciones de piso fueron determinadas considerando las propiedades de límite superior. La Norma E.031 (MVCS, 2020) no indica ningún tipo de restricción para las aceleraciones de piso, sin embargo, en el capítulo 5 del manual técnico HAZUS-MH MR4 (FEMA, 2003) se indica que estas no deben ser mayores a 0.30g.

A continuación, se muestran las máximas aceleraciones de piso de la superestructura obtenidas al usar el sistema LRB+SL para cada registro de aceleración.

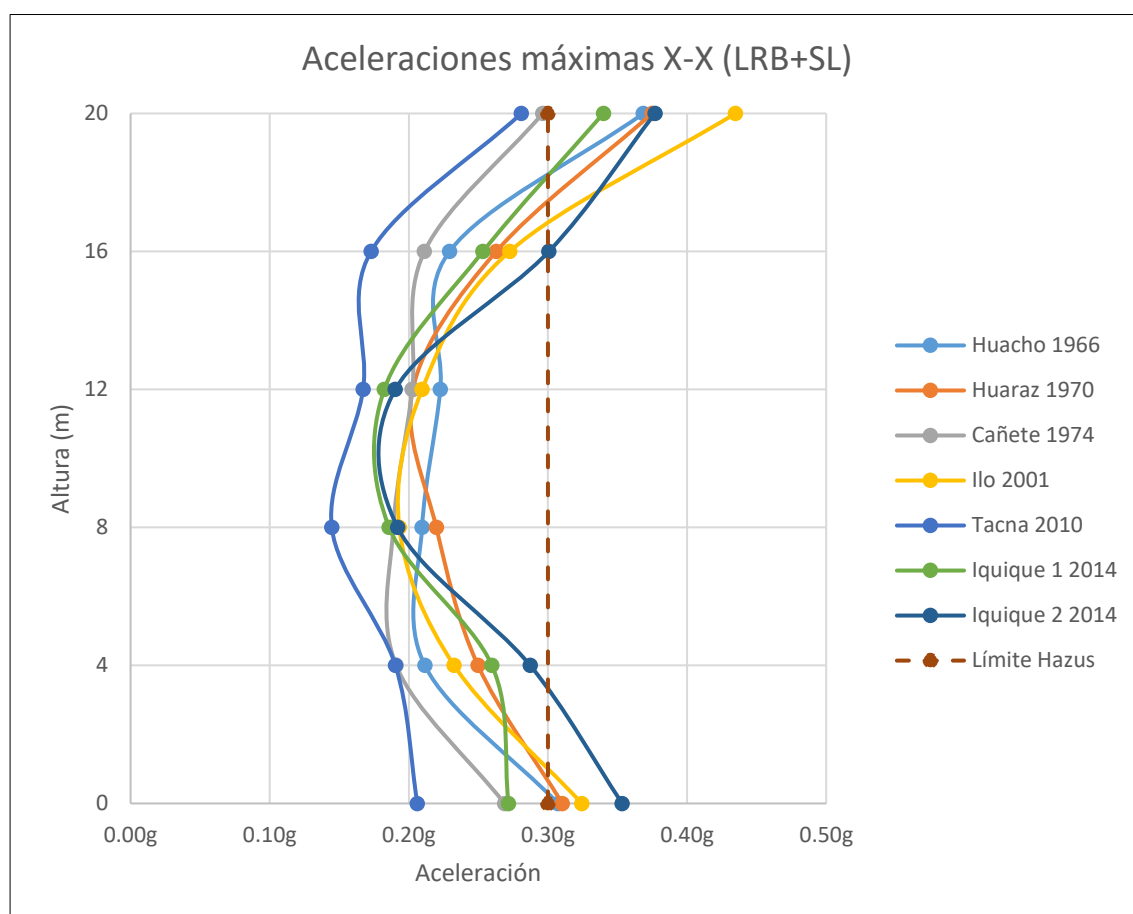
Tabla 55

Máximas aceleraciones de piso para el sistema LRB+SL en el eje X

Aceleraciones Máximas X-X (LRB+SL)							
Nivel	Huacho 1966	Huaraz 1970	Cañete 1974	Ilo 2001	Tacna 2010	Iquique 1 2014	Iquique 2 2014
5	0.369g	0.375g	0.296g	0.435g	0.281g	0.340g	0.377g
4	0.229g	0.263g	0.211g	0.272g	0.173g	0.253g	0.301g
3	0.223g	0.203g	0.202g	0.210g	0.167g	0.182g	0.190g
2	0.209g	0.220g	0.189g	0.193g	0.145g	0.186g	0.192g
1	0.211g	0.250g	0.191g	0.233g	0.190g	0.260g	0.287g
Piso Técnico	0.307g	0.310g	0.269g	0.324g	0.206g	0.272g	0.353g

Figura 79

Máximas aceleraciones de piso para el sistema LRB+SL en el eje X

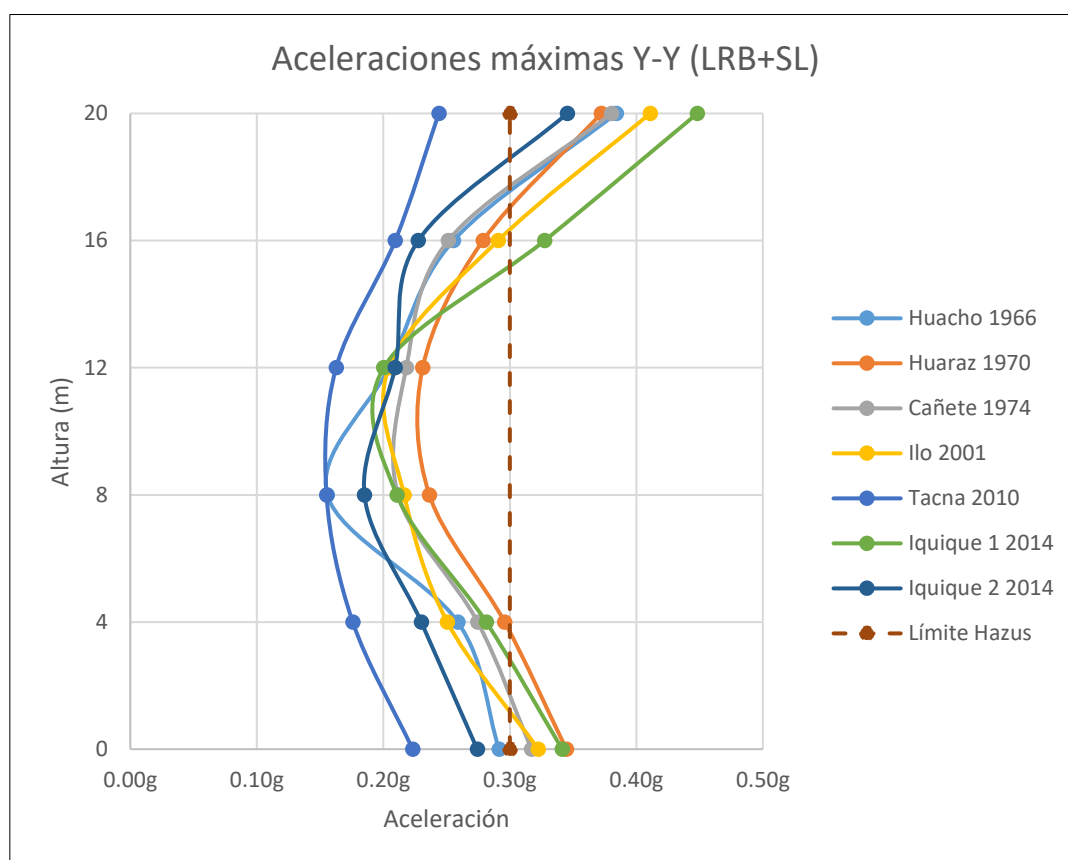
**Tabla 56**

Máximas aceleraciones de piso para el sistema LRB+SL en el eje Y

Aceleraciones Máximas Y-Y (LRB+SL)							
Nivel	Huacho 1966	Huaraz 1970	Cañete 1974	Ilo 2001	Tacna 2010	Iquique 1 2014	Iquique 2 2014
5	0.384g	0.372g	0.380g	0.411g	0.244g	0.448g	0.345g
4	0.255g	0.279g	0.251g	0.291g	0.209g	0.327g	0.228g
3	0.205g	0.231g	0.218g	0.204g	0.163g	0.200g	0.209g
2	0.156g	0.236g	0.212g	0.216g	0.155g	0.211g	0.185g
1	0.259g	0.296g	0.275g	0.251g	0.176g	0.281g	0.230g
Piso Técnico	0.291g	0.345g	0.317g	0.322g	0.223g	0.341g	0.274g

Figura 80

Máximas aceleraciones de piso para el sistema LRB+SL en el eje Y



A continuación, se muestran las máximas aceleraciones de piso de la superestructura obtenidas al usar el sistema LRB+HDR+SL para cada registro de aceleración.

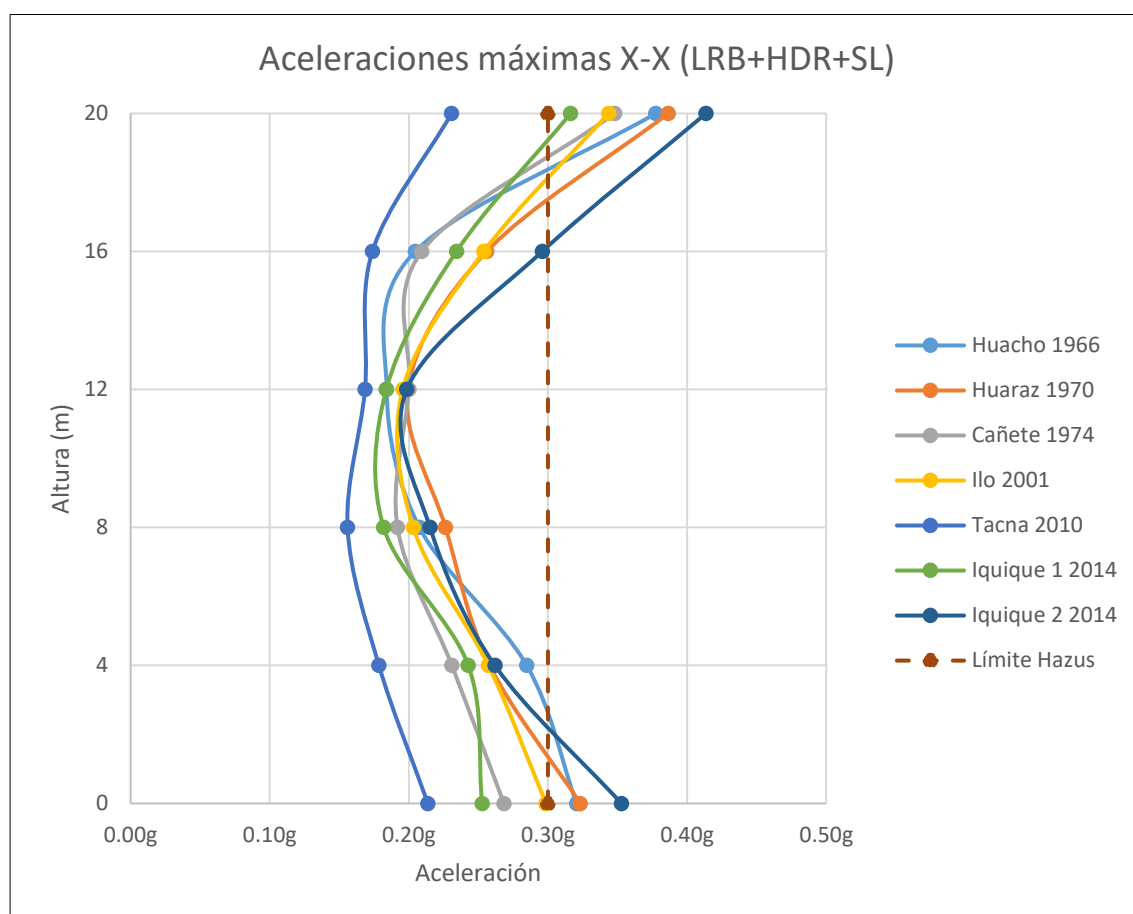
Tabla 57

Máximas aceleraciones de piso para el sistema LRB+HDR+SL en el eje X

Aceleraciones Máximas X-X (LRB+HDR+SL)							
Nivel	Huacho 1966	Huaraz 1970	Cañete 1974	Ilo 2001	Tacna 2010	Iquique 1 2014	Iquique 2 2014
5	0.378g	0.387g	0.348g	0.344g	0.231g	0.316g	0.414g
4	0.205g	0.256g	0.209g	0.254g	0.174g	0.234g	0.296g
3	0.184g	0.199g	0.200g	0.196g	0.168g	0.184g	0.199g
2	0.208g	0.226g	0.192g	0.203g	0.156g	0.182g	0.215g
1	0.285g	0.258g	0.231g	0.257g	0.179g	0.243g	0.262g
Piso Técnico	0.321g	0.323g	0.268g	0.299g	0.214g	0.253g	0.353g

Figura 81

Máximas aceleraciones de piso para el sistema LRB+HDR+SL en el eje X

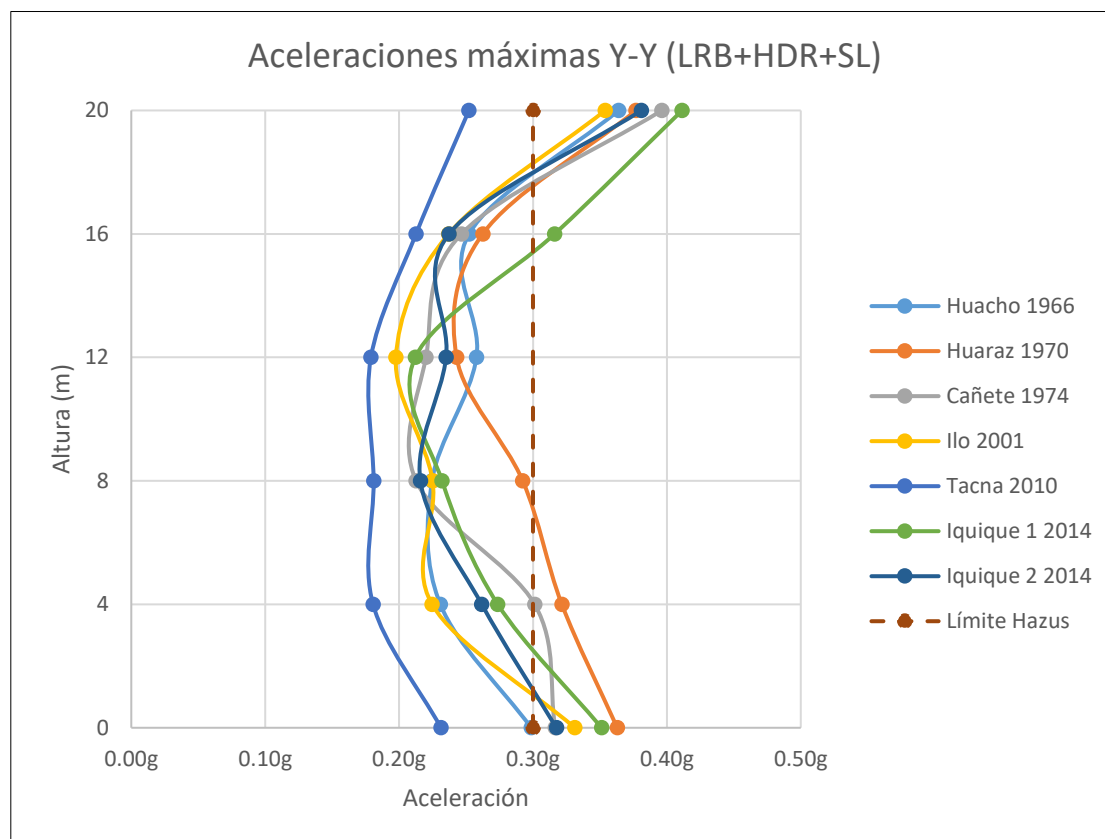
**Tabla 58**

Máximas aceleraciones de piso para el sistema LRB+HDR+SL en el eje Y

Aceleraciones Máximas Y-Y (LRB+HDR+SL)							
Nivel	Huacho 1966	Huaraz 1970	Cañete 1974	Ilo 2001	Tacna 2010	Iquique 1 2014	Iquique 2 2014
5	0.364g	0.377g	0.396g	0.354g	0.252g	0.411g	0.381g
4	0.252g	0.262g	0.247g	0.237g	0.213g	0.316g	0.237g
3	0.258g	0.243g	0.220g	0.198g	0.179g	0.212g	0.235g
2	0.225g	0.292g	0.213g	0.225g	0.181g	0.232g	0.216g
1	0.231g	0.322g	0.301g	0.225g	0.181g	0.274g	0.262g
Piso Técnico	0.299g	0.363g	0.317g	0.331g	0.231g	0.351g	0.317g

Figura 82

Máximas aceleraciones de piso para el sistema LRB+HDR+SL en el eje Y



A continuación, se muestran las máximas aceleraciones de piso de la superestructura obtenidas al usar el sistema TFP para cada registro de aceleración.

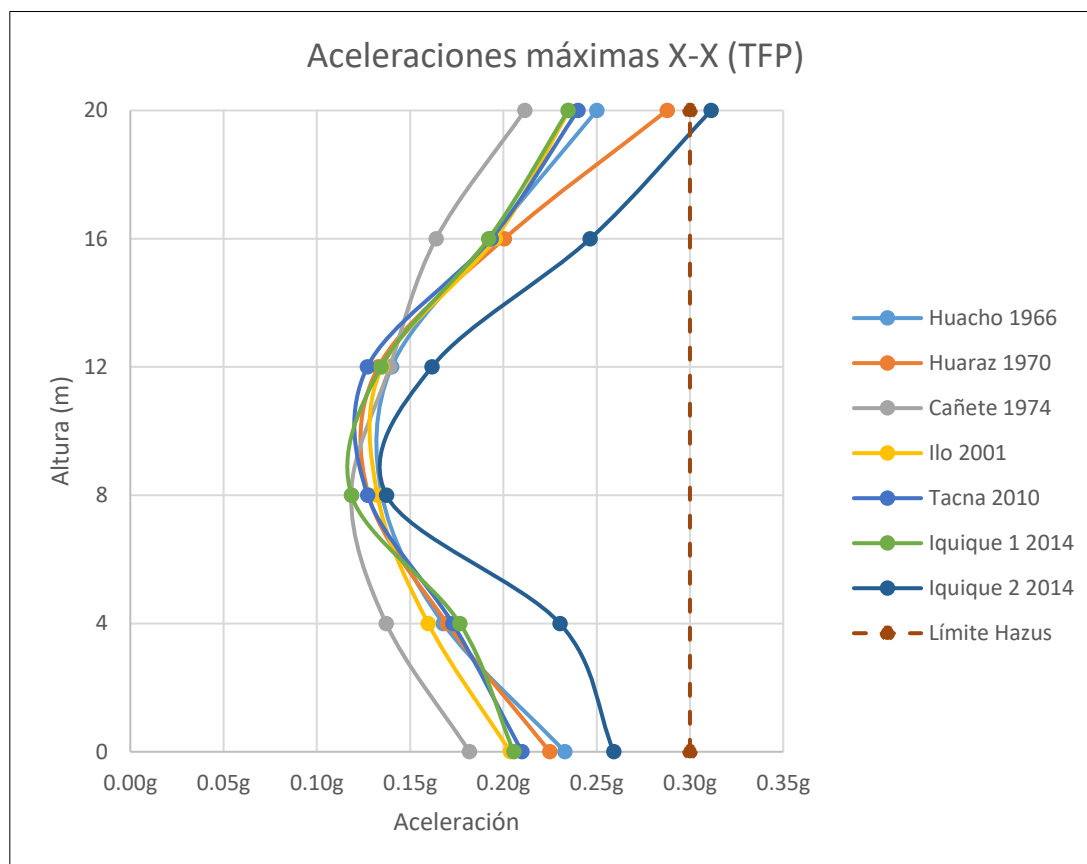
Tabla 59

Máximas aceleraciones de piso para el sistema TFP en el eje X

Aceleraciones Máximas X-X (TFP)							
Nivel	Huacho 1966	Huaraz 1970	Cañete 1974	Ilo 2001	Tacna 2010	Iquique 1 2014	Iquique 2 2014
5	0.250g	0.288g	0.211g	0.235g	0.240g	0.235g	0.311g
4	0.193g	0.201g	0.164g	0.196g	0.193g	0.192g	0.247g
3	0.140g	0.133g	0.139g	0.135g	0.127g	0.134g	0.162g
2	0.135g	0.128g	0.118g	0.132g	0.127g	0.119g	0.137g
1	0.168g	0.170g	0.137g	0.160g	0.173g	0.177g	0.230g
Piso Técnico	0.233g	0.225g	0.182g	0.204g	0.210g	0.206g	0.259g

Figura 83

Máximas aceleraciones de piso para el sistema TFP en el eje X

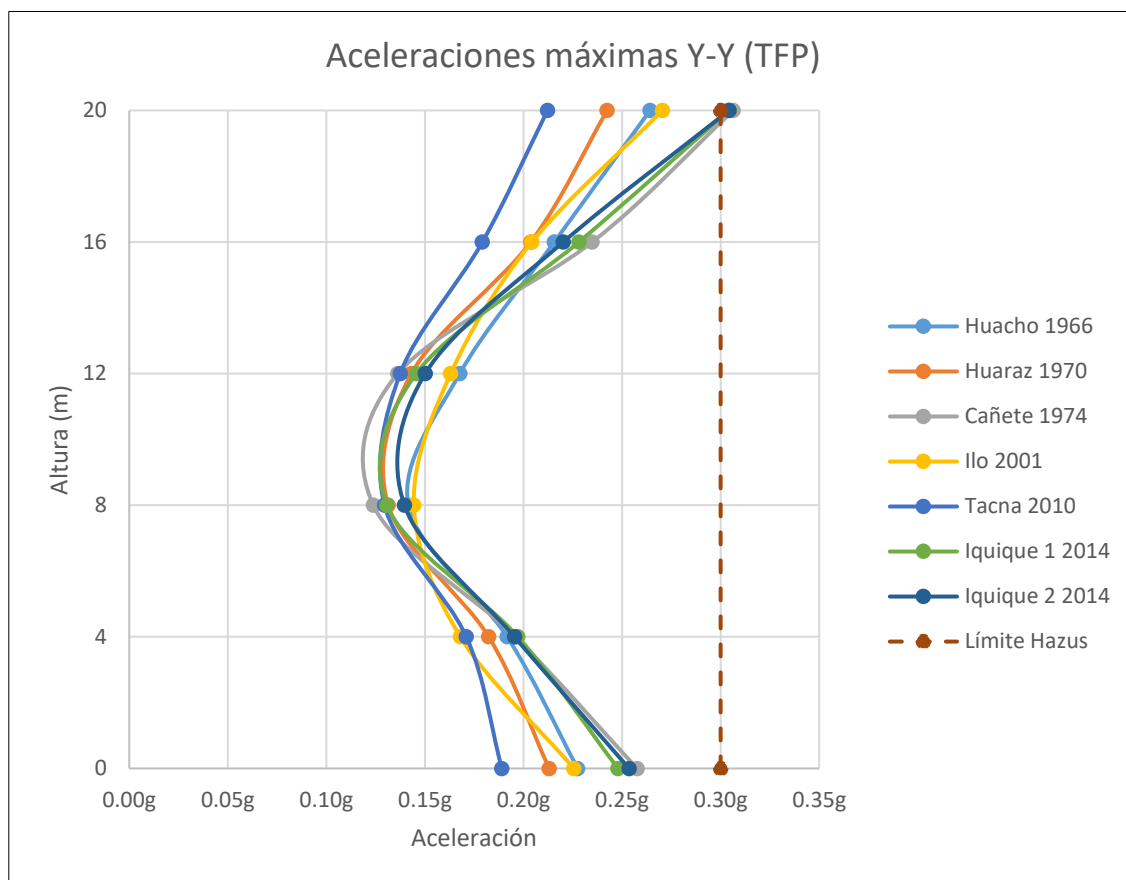
**Tabla 60**

Máximas aceleraciones de piso para el sistema TFP en el eje Y

Aceleraciones Máximas Y-Y (TFP)							
Nivel	Huacho 1966	Huaraz 1970	Cañete 1974	Ilo 2001	Tacna 2010	Iquique 1 2014	Iquique 2 2014
5	0.264g	0.242g	0.306g	0.270g	0.212g	0.304g	0.304g
4	0.216g	0.204g	0.235g	0.204g	0.179g	0.228g	0.220g
3	0.168g	0.143g	0.136g	0.163g	0.137g	0.146g	0.150g
2	0.142g	0.131g	0.124g	0.144g	0.129g	0.131g	0.140g
1	0.192g	0.182g	0.196g	0.168g	0.171g	0.197g	0.195g
Piso Técnico	0.227g	0.213g	0.258g	0.226g	0.189g	0.248g	0.254g

Figura 84

Máximas aceleraciones de piso para el sistema TFP en el eje Y



A continuación, se muestra el promedio de las máximas aceleraciones de piso de los siete pares de registros utilizados en la superestructura para los tres sistemas de aislamiento.

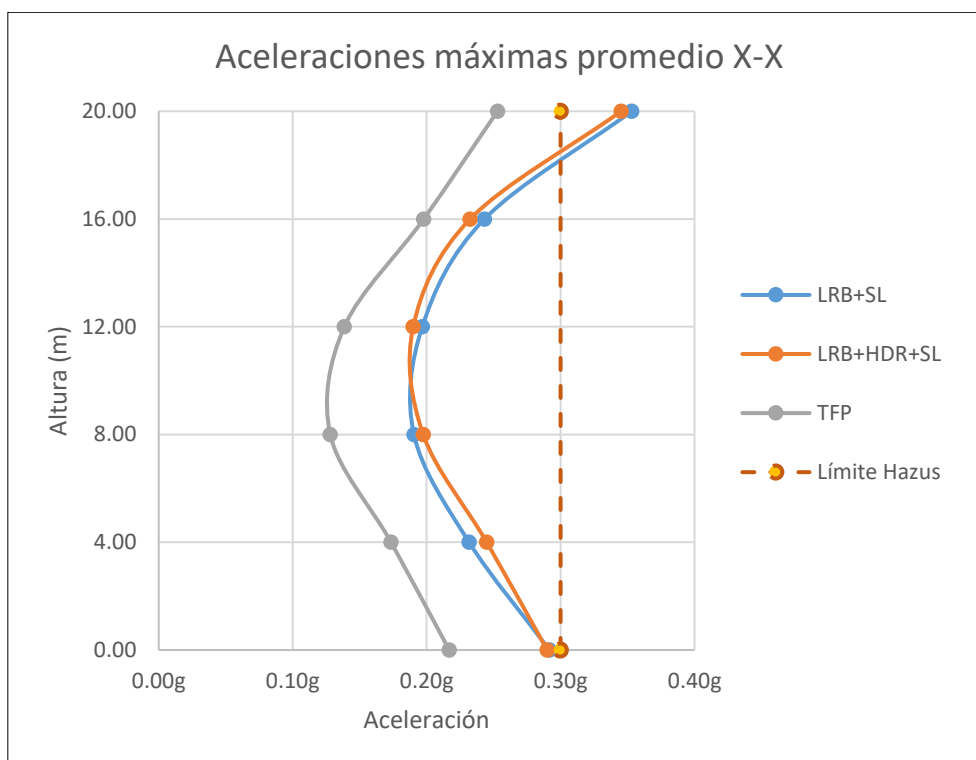
Tabla 61

Aceleraciones máximas promedio para los tres sistemas de aislamiento

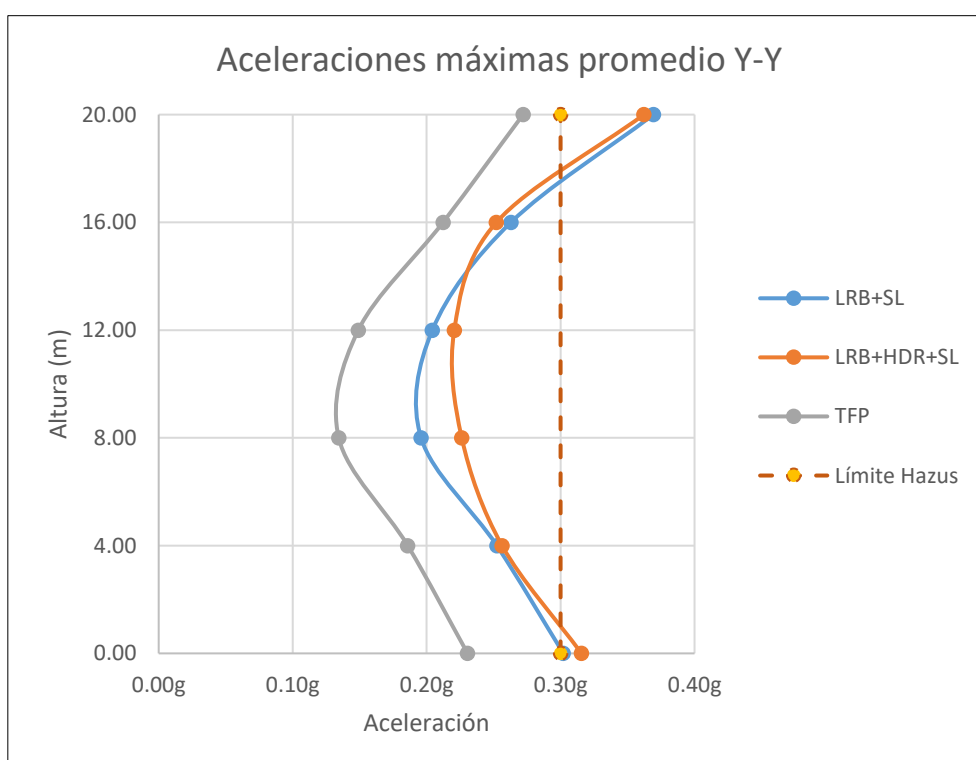
Nivel	Altura (m)	Aceleraciones máximas promedio					
		LRB+SL		LRB+HDR+SL		TFP	
		X-X	Y-Y	X-X	Y-Y	X-X	Y-Y
5	20.00	0.353g	0.369g	0.345g	0.362g	0.253g	0.272g
4	16.00	0.243g	0.263g	0.233g	0.252g	0.198g	0.212g
3	12.00	0.197g	0.204g	0.190g	0.221g	0.139g	0.149g
2	8.00	0.191g	0.196g	0.197g	0.226g	0.128g	0.134g
1	4.00	0.232g	0.252g	0.245g	0.256g	0.173g	0.186g
Piso Técnico	0.00	0.292g	0.302g	0.290g	0.316g	0.217g	0.231g

Figura 85

Aceleraciones máximas promedio de los sistemas de aislamiento en el eje X

**Figura 86**

Aceleraciones máximas promedio de los sistemas de aislamiento en el eje Y



Se puede observar en las figuras 81 y 82 que la azotea y el nivel de base de la estructura con sistemas LRB+SL y LRB+HDR+SL presenta aceleraciones de piso mayores al límite de 0.30g indicado en el capítulo 5 del manual técnico HAZUS-MH MR4 (FEMA, 2003). Por el contrario, el sistema TFP presenta aceleraciones de piso menores a 0.30g en todos los niveles.

Como se observa en la tabla 61, la máxima aceleración promedio de piso del sistema LRB+SL fue de 0.353g en el eje X y de 0.369g en el eje Y, para el caso del sistema LRB+HDR+SL fue de 0.345g en el eje X y de 0.362g en el eje Y, por último, para el caso del sistema TFP fue de 0.253g en el eje X y de 0.272g en el eje Y.

Se concluyó que el sistema TFP fue el que presentó las menores aceleraciones de piso para ambas direcciones de análisis X e Y.

Desplazamiento máximo del sistema de aislamiento (D_{TM})

Los desplazamientos máximos de los tres sistemas de aislamiento fueron obtenidos para las propiedades de límite inferior. A continuación, se muestran estos desplazamientos para cada par de registro de aceleración.

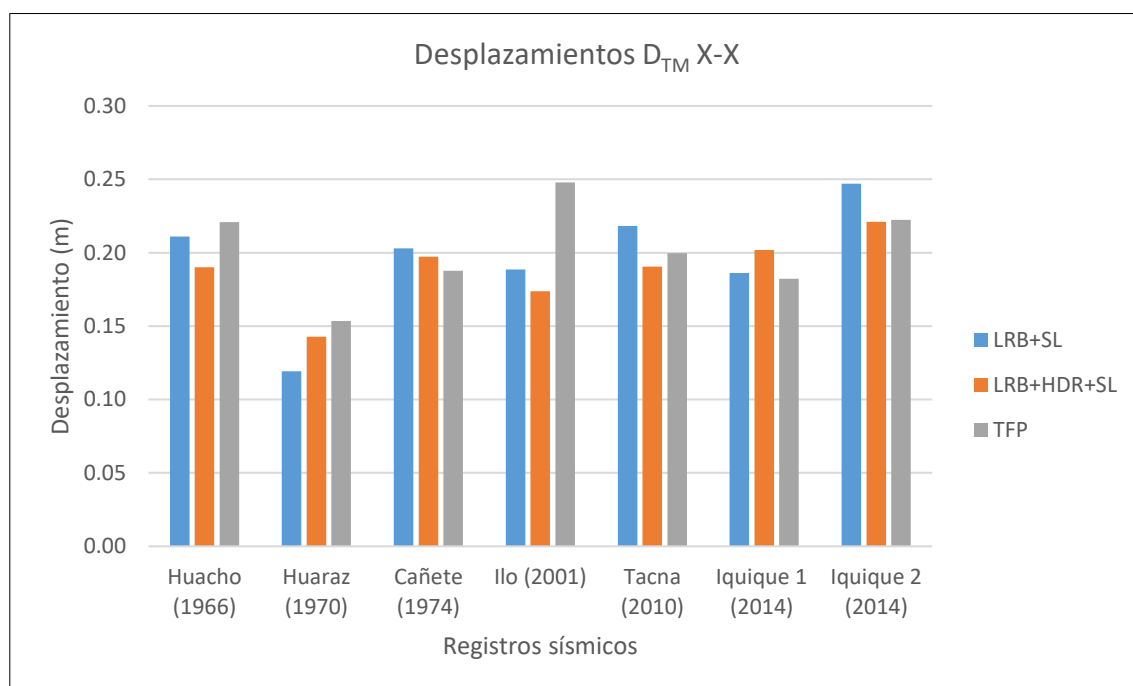
Tabla 62

Desplazamientos máximos de los tres sistemas de aislamiento para cada registro sísmico

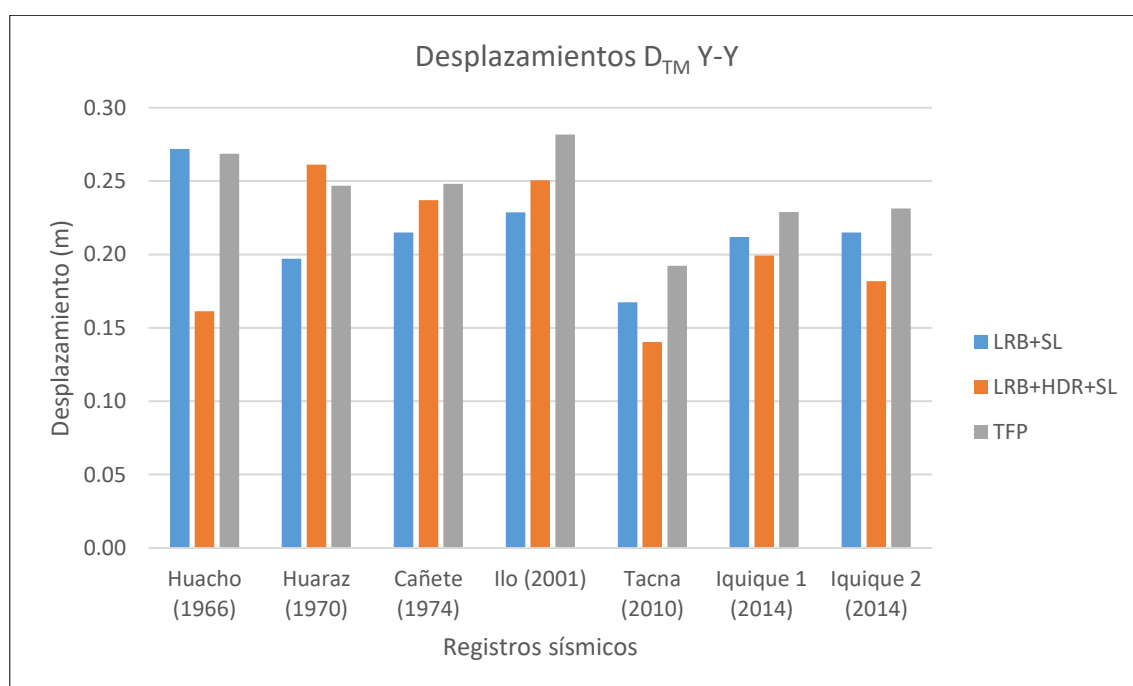
Registros Sísmicos	LRB + SL		LRB + HDR + SL		TFP	
	$D_{TM X}$ (m)	$D_{TM Y}$ (m)	$D_{TM X}$ (m)	$D_{TM Y}$ (m)	$D_{TM X}$ (m)	$D_{TM Y}$ (m)
Huacho 1966	0.211	0.272	0.190	0.161	0.221	0.269
Huaraz 1970	0.119	0.197	0.143	0.261	0.153	0.247
Cañete 1974	0.203	0.215	0.197	0.237	0.188	0.248
Ilo 2001	0.189	0.229	0.174	0.250	0.248	0.282
Tacna 2010	0.218	0.168	0.191	0.140	0.200	0.192
Iquique 1 2014	0.186	0.212	0.202	0.199	0.182	0.229
Iquique 2 2014	0.247	0.215	0.221	0.182	0.223	0.231
Promedio	0.196	0.215	0.188	0.205	0.202	0.243

Figura 87

Desplazamientos máximos de los tres sistemas de aislamiento para cada registro sísmico en el eje X

**Figura 88**

Desplazamientos máximos de los tres sistemas de aislamiento para cada registro sísmico en el eje Y



A continuación, se muestran los promedios de los desplazamientos máximos de los tres sistemas de aislamiento.

Figura 89

Desplazamientos máximos promedio de los tres sistemas de aislamiento sísmico en el eje X

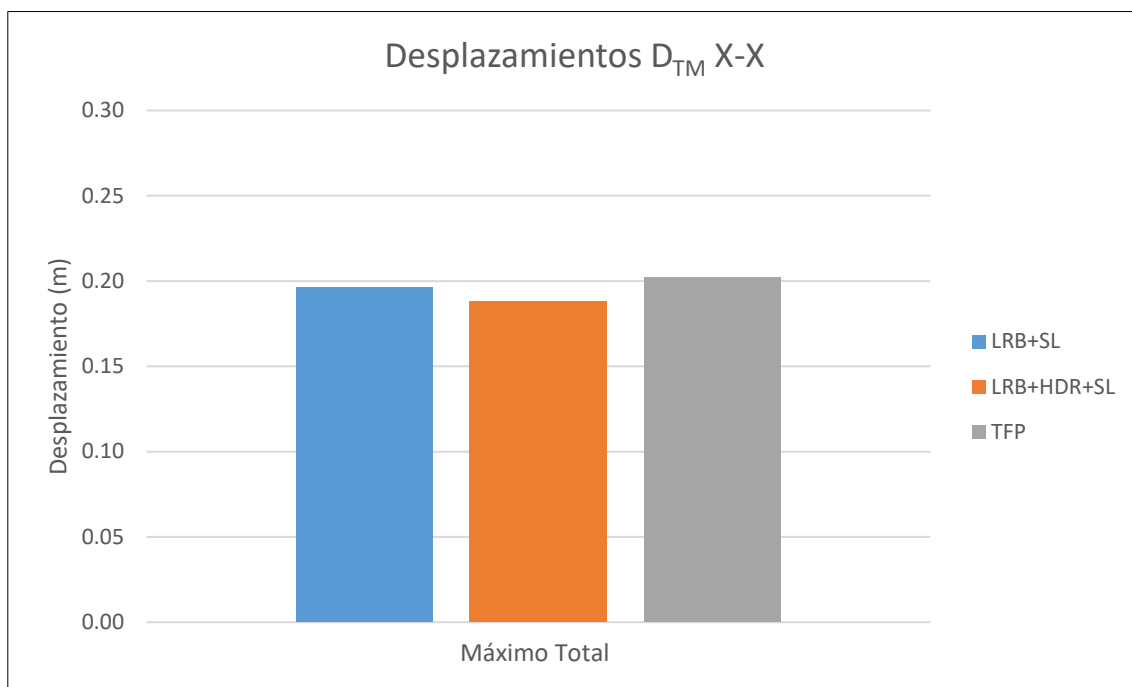
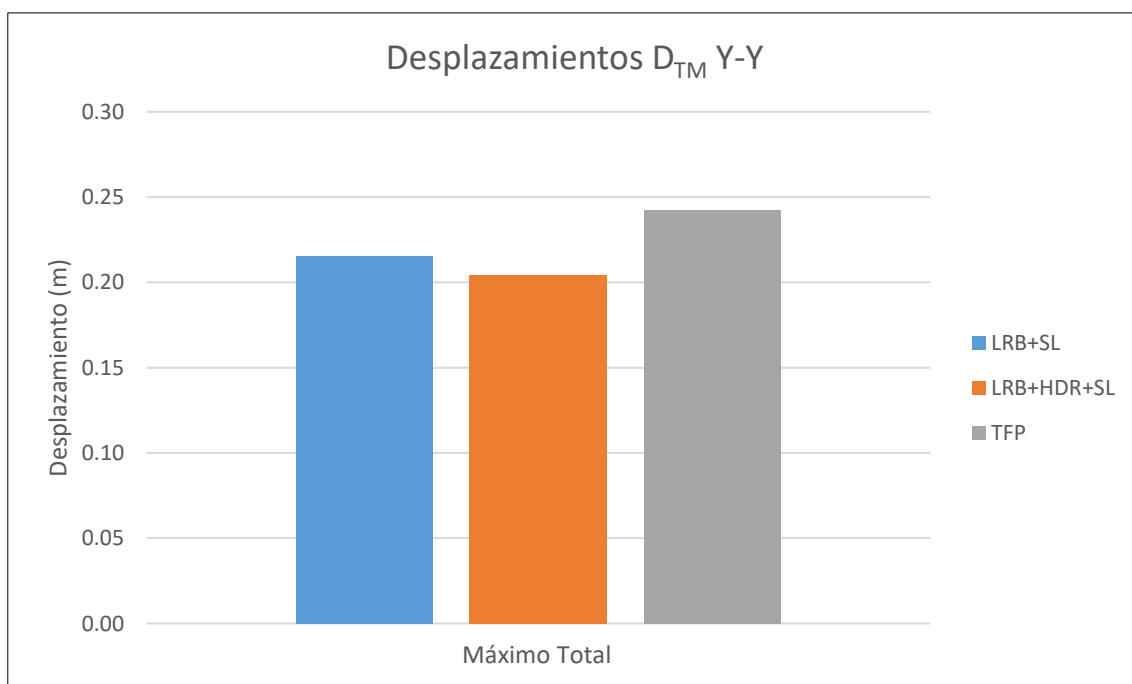


Figura 90

Desplazamientos máximos promedio de los tres sistemas de aislamiento sísmico en el eje Y



Se puede observar en la tabla 62 que los desplazamientos máximos promedio del sistema LRB+SL fueron de 0.196 m en el eje X y de 0.215 m en el eje Y, para el caso del sistema LRB+HDR+SL fueron de 0.188 m en el eje X y de 0.205 m en el eje Y, por último, para el caso del sistema TFP fueron de 0.202 m en el eje X y de 0.243 m en el eje Y.

Se concluyó que el sistema TFP fue el que presentó los mayores desplazamientos en ambas direcciones de análisis X e Y.

Fuerza cortante en la base de la superestructura aislada (V_s)

Las fuerzas cortantes obtenidas en la base de la estructura sobre cada sistema de aislamiento analizado fueron determinadas considerando las propiedades de límite superior. A continuación, se muestran estas fuerzas cortantes para cada par de registro de aceleración.

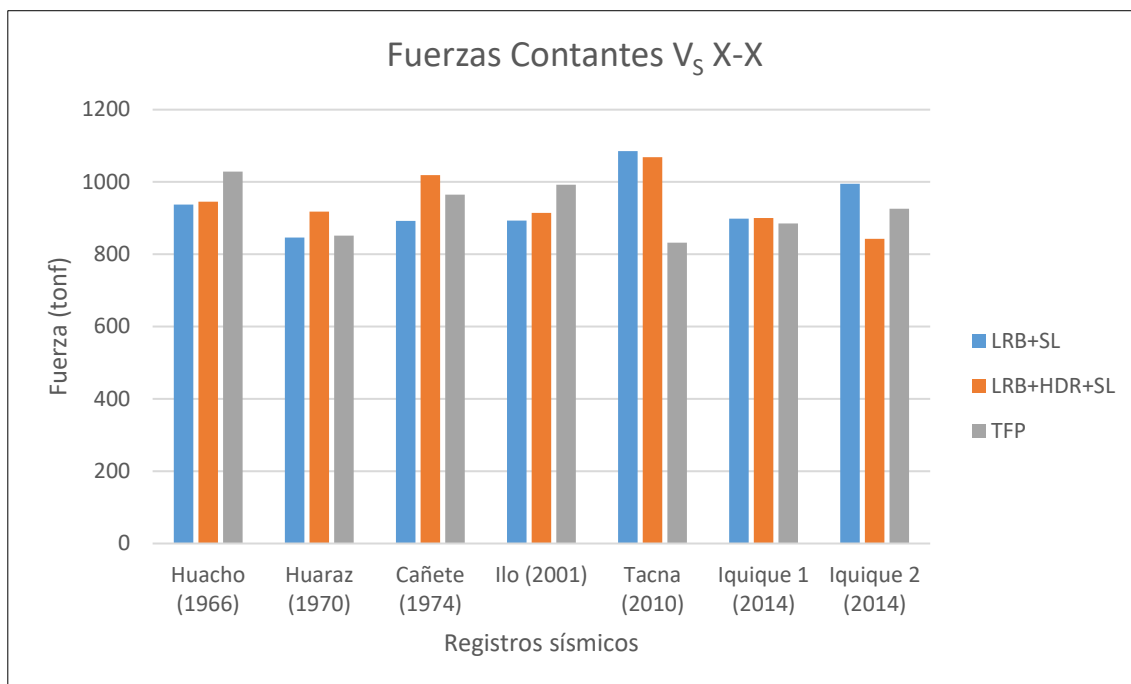
Tabla 63

Fuerzas cortantes máximas en la base de la estructura sobre los sistemas de aislamiento para cada registro sísmico

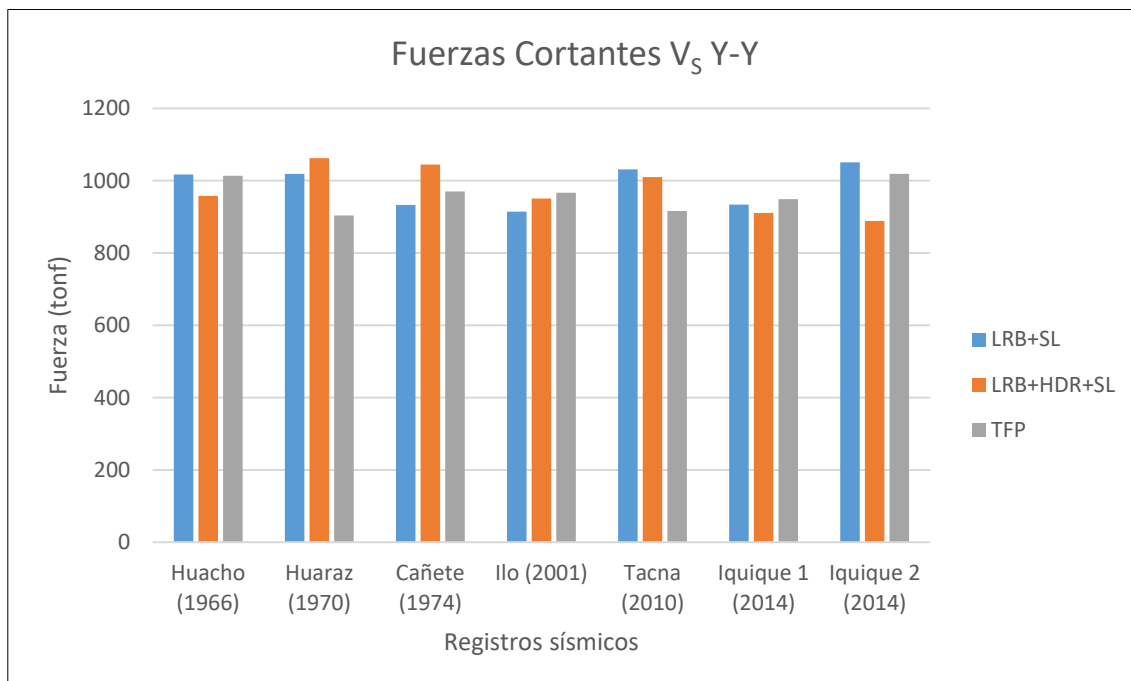
Registros Sísmicos	LRB + SL		LRB + HDR + SL		TFP	
	V_{S-X} (EW) (tonf)	V_{S-Y} (NS) (tonf)	V_{S-X} (EW) (tonf)	V_{S-Y} (NS) (tonf)	V_{S-X} (EW) (tonf)	V_{S-Y} (NS) (tonf)
Huacho (1966)	937.57	1016.81	945.73	957.49	1028.76	1013.99
Huaraz (1970)	846.38	1019.10	918.29	1062.62	851.78	903.90
Cañete (1974)	892.60	932.89	1018.77	1044.30	964.77	970.10
Ilo (2001)	893.41	914.78	914.16	950.48	992.41	966.83
Tacna (2010)	1085.64	1031.17	1068.32	1010.08	832.49	915.80
Iquique 1 (2014)	898.63	933.84	900.07	910.62	885.42	949.31
Iquique 2 (2014)	995.30	1051.16	842.56	888.97	926.15	1018.70
Promedio	935.65	985.68	943.99	974.94	925.97	962.66

Figura 91

Fuerzas cortantes máximas en la base de la estructura sobre los sistemas de aislamiento para cada registro sísmico en el eje X

**Figura 92**

Fuerzas cortantes máximas en la base de la estructura sobre los sistemas de aislamiento para cada registro sísmico en el eje Y



A continuación, se muestran las fuerzas cortantes máximas promedio en la base de la estructura sobre los tres sistemas de aislamiento.

Figura 93

Fuerzas cortantes máximas promedio en la base de la estructura sobre los tres sistemas de aislamiento en el eje X

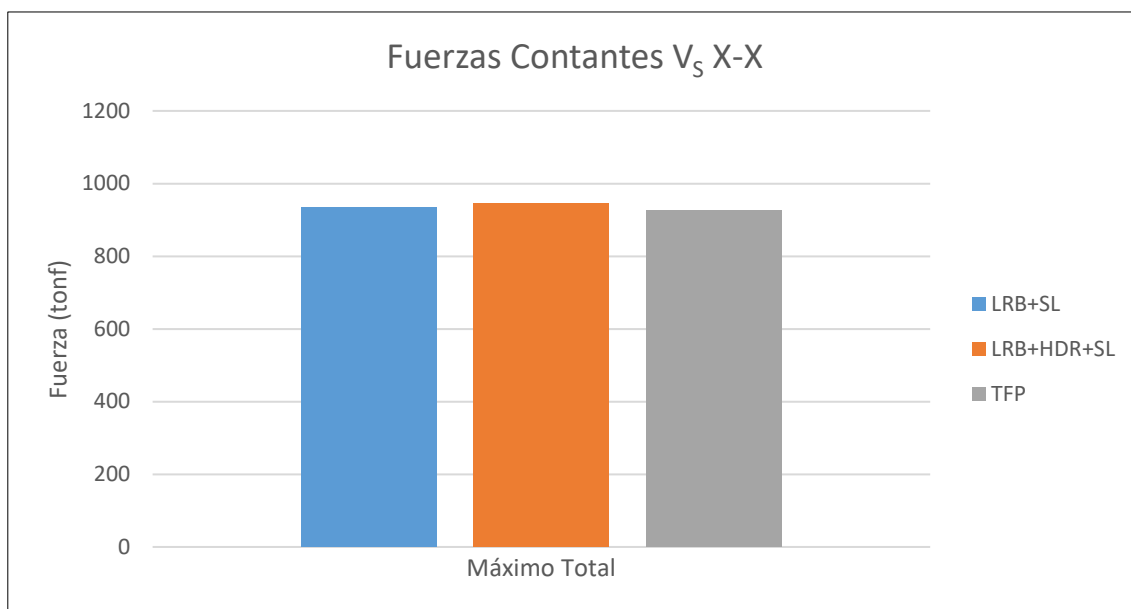
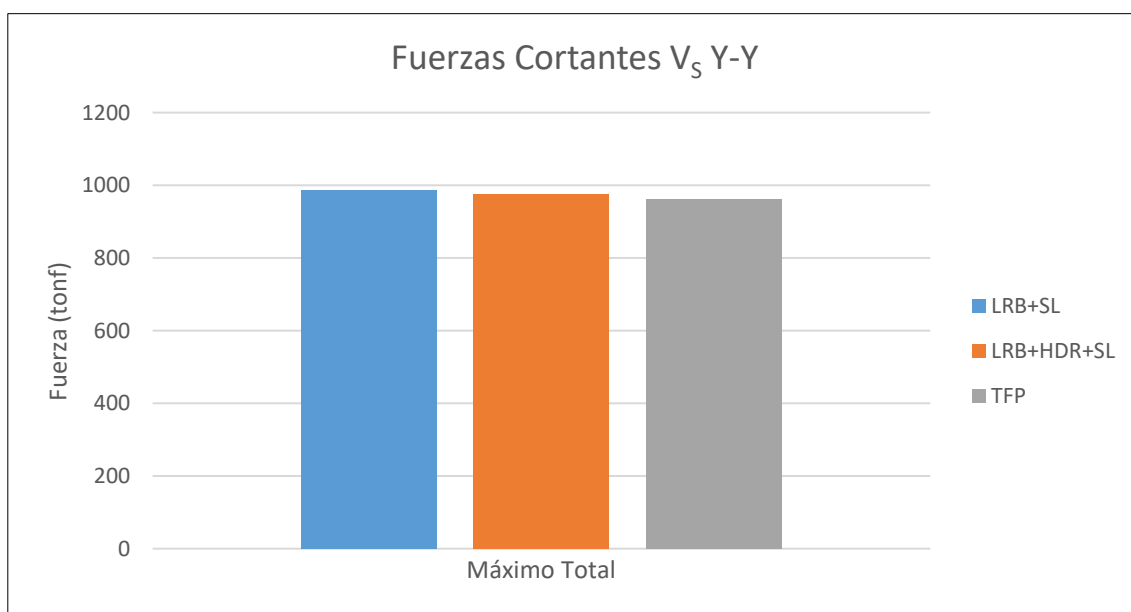


Figura 94

Fuerzas cortantes máximas promedio en la base de la estructura sobre los tres sistemas de aislamiento en el eje Y



Se puede observar en la tabla 63 que las fuerzas cortantes máximas promedio en la base de la estructura sobre el sistema LRB+SL fueron de 935.65 tonf en el eje X y de 985.68 tonf en el eje Y, para el caso del sistema LRB+HDR+SL fueron de 943.99 tonf en el eje X y de 974.94 tonf en el eje Y, por último, para el caso del sistema TFP fueron de 925.97 tonf en el eje X y de 962.66 tonf en el eje Y.

Se concluyó que el sistema TFP fue el que presentó las menores fuerzas cortantes en la base de la estructura sobre el sistema de aislamiento en ambas direcciones de análisis X e Y.

Fuerza cortante en el sistema de aislamiento (V_b)

Las fuerzas cortantes que actúan en los sistemas de aislamiento sísmico fueron determinadas considerando las propiedades de límite superior. A continuación, se muestran estas fuerzas cortantes para cada par de registros de aceleración.

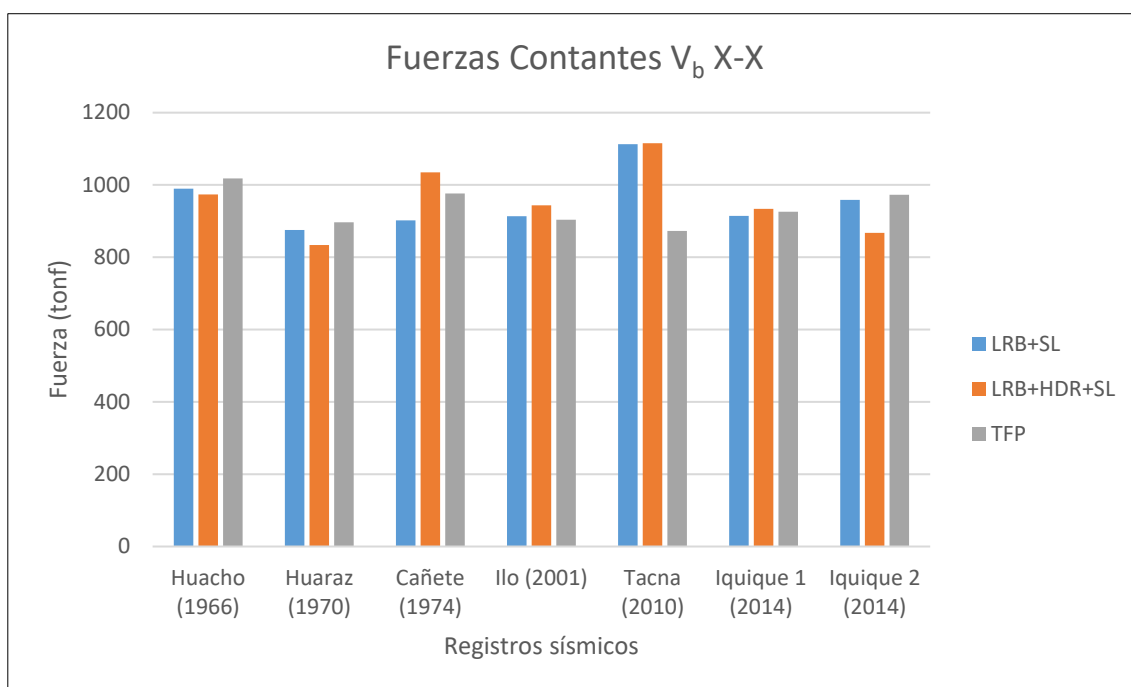
Tabla 64

Fuerzas cortantes máximas en los sistemas de aislamiento para cada registro sísmico

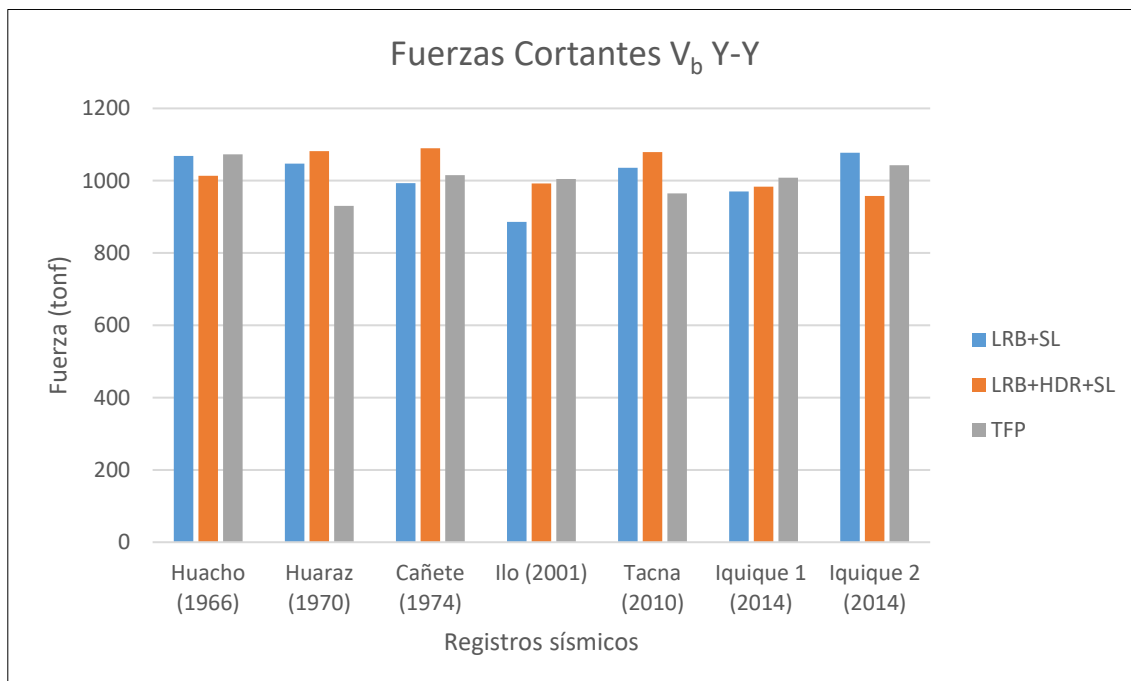
Registros Sísmicos	LRB + SL		LRB + HDR + SL		TFP	
	V_{b-X} (EW) (tonf)	V_{b-Y} (NS) (tonf)	V_{b-X} (EW) (tonf)	V_{b-Y} (NS) (tonf)	V_{b-X} (EW) (tonf)	V_{b-Y} (NS) (tonf)
Huacho (1966)	989.42	1068.54	973.67	1014.02	1018.22	1072.64
Huaraz (1970)	875.26	1046.86	834.21	1081.41	896.49	930.48
Cañete (1974)	902.37	993.56	1035.30	1090.09	976.59	1015.22
Ilo (2001)	913.95	885.69	943.81	992.04	904.04	1004.42
Tacna (2010)	1112.56	1035.39	1115.58	1079.23	872.51	964.52
Iquique 1 (2014)	914.65	970.11	933.69	983.68	926.04	1008.40
Iquique 2 (2014)	958.41	1077.15	867.28	957.73	972.72	1042.55
Promedio	952.37	1011.04	957.65	1028.32	938.09	1005.46

Figura 95

Fuerzas cortantes máximas en los sistemas de aislamiento para cada registro sísmico en el eje X

**Figura 96**

Fuerzas cortantes máximas en los sistemas de aislamiento para cada registro sísmico en el eje Y



A continuación, se muestran las fuerzas cortantes máximas sobre los tres sistemas de aislamiento o elementos estructurales bajo el nivel de aislamiento.

Figura 97

Fuerzas cortantes máximas en los tres sistemas de aislamiento en el eje X

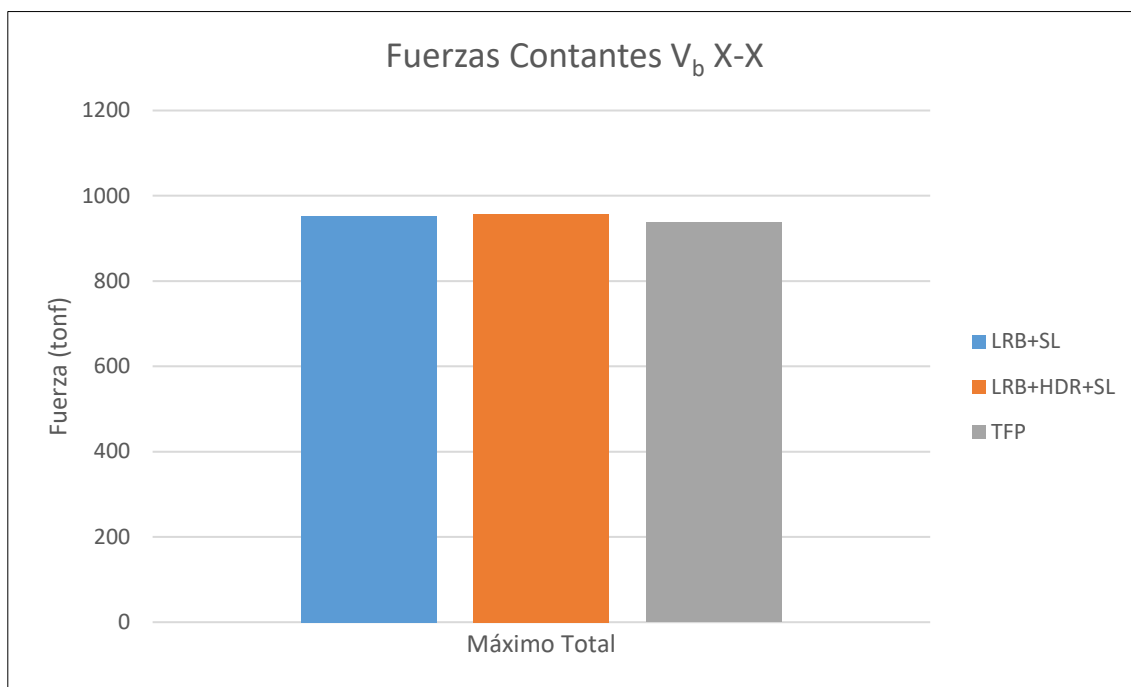
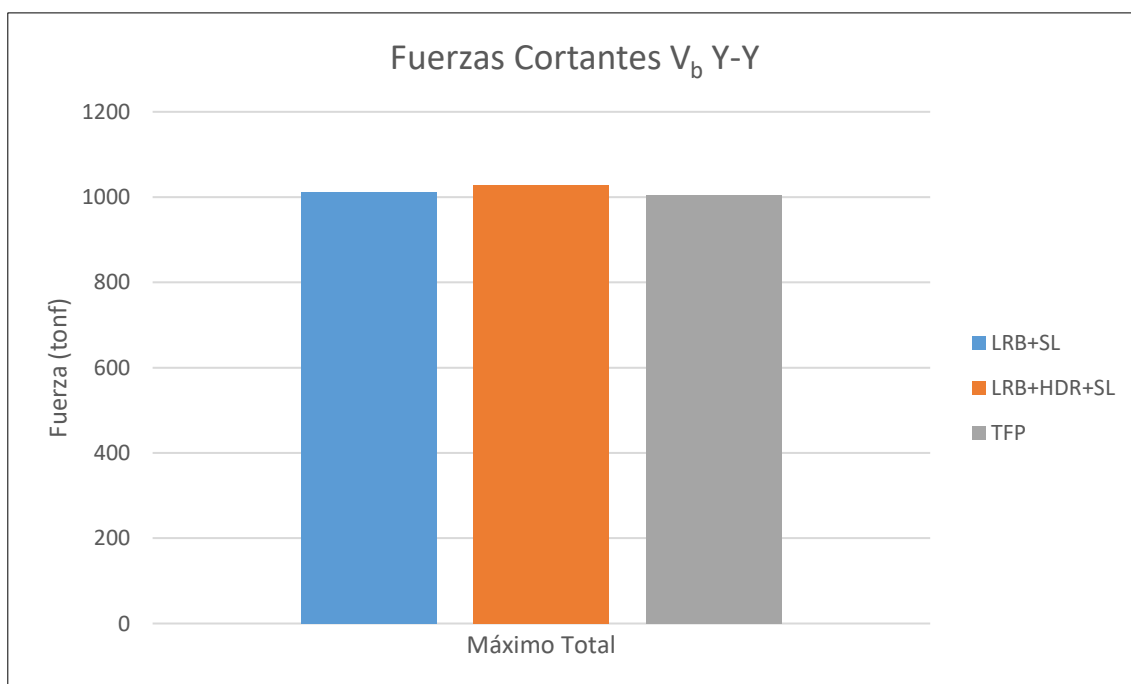


Figura 98

Fuerzas cortantes máximas en los tres sistemas de aislamiento en el eje Y



Se puede observar en la tabla 64 que las fuerzas cortantes máximas promedio en el sistema LRB+SL fueron de 952.37 tonf en el eje X y de 1011.04 tonf en el eje Y, para el caso del sistema LRB+HDR+SL fueron de 957.65 tonf en el eje X y de 1028.32 tonf en el eje Y, por último, para el caso del sistema TFP fueron de 938.09 tonf en el eje X y de 1005.46 tonf en el eje Y.

Se concluyó que el sistema TFP fue el que presentó las menores fuerzas cortantes en el sistema de aislamiento en ambas direcciones de análisis X e Y.

V. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Derivas de entrepiso

Los resultados mostrados en la tabla 54 indicaron que las mayores derivas promedio de entrepiso del sistema LRB+SL fueron de 0.001330 en el eje X y de 0.001413 en el eje Y, del sistema LRB+HDR+SL fueron de 0.001264 en el eje X y de 0.001385 en el eje Y, y del sistema TFP fueron de 0.001109 en el eje X y de 0.001249 en el eje Y, donde se observó que al usar dispositivos TFP se logró obtener menores derivas. Melendrez y Pantoja (2020) mencionan que al comparar cuatro sistemas de aislamiento en una edificación aporticada, de trece niveles, de uso comercial, ubicada en la zona sísmica 4 y con un suelo rígido S_1 , las menores derivas de entrepiso se obtuvieron al utilizar el sistema conformado por dispositivos de triple péndulo de fricción (TFP), teniendo como máximos resultados derivas de 0.0047 en el eje X y 0.0040 en el eje Y. Estos resultados son en cierta medida similares a los encontrados en la presente investigación, sin embargo, son mayores a los mostrados en la tabla 54 para el sistema TFP. Una de las posibles causas de esta diferencia en los resultados podría deberse a las configuraciones de las edificaciones utilizadas, ya que Melendrez y Pantoja (2020) analizaron una edificación que al ser más alta presentó un ratio de esbeltez de aproximadamente 2.30, mayor al 0.82 correspondiente a la edificación hospitalaria evaluada en esta investigación, lo que pudo hacerla más susceptible a la acción de las cargas sísmicas, además de contar con un período fundamental más largo y por ende mayores desplazamientos, lo que pudo haber influido en mayores derivas.

Por otro lado, Chacón (2018) menciona que al comparar tres sistemas de aislamiento en una edificación aporticada, de tres niveles, de uso hospitalario, ubicada en la zona sísmica 3 y con un suelo blando S_3 , las menores derivas de entrepiso se obtuvieron al utilizar el sistema conformado por dispositivos de triple péndulo de fricción (TFP), teniendo como máximos resultados derivas de 0.0019 en el eje X y 0.0022 en el eje Y sin considerar la interacción suelo

estructura, y derivas de 0.0020 en el eje X y 0.0024 en el eje Y considerando la interacción suelo estructura. Estos resultados son en cierta medida similares a los encontrados en la presente investigación, sin embargo, son mayores a los mostrados en la tabla 54 para el sistema TFP. La posible causa de esta diferencia en los resultados podrían deberse al tipo de suelo, ya que Chacón (2018) analizó una edificación, que a pesar de tener menor altura, estar en la zona sísmica 3 y un menor ratio de esbeltez de aproximadamente 0.64 en comparación con el 0.82 de la edificación hospitalaria evaluada en esta investigación, estaba cimentada sobre suelo blando, este tipo de suelo se caracteriza por amplificar los desplazamientos del terreno ante la acción sísmica, lo cual pudo haber influido en mayores derivas en la superestructura.

Acercaciones de piso

Los resultados mostrados en la tabla 61 indicaron que las mayores aceleraciones promedio de piso del sistema LRB+SL fueron de 0.353g en el eje X y de 0.369g en el eje Y, del sistema LRB+HDR+SL fueron de 0.345g en el eje X y de 0.362g en el eje Y, y del sistema TFP fueron de 0.253g en el eje X y de 0.272g en el eje Y, donde se observó que al usar dispositivos TFP se logró obtener menores aceleraciones de piso. Chacón (2018) menciona que al comparar tres sistemas de aislamiento en una edificación aporticada, de cuatro niveles, de uso hospitalario, ubicada en la zona sísmica 3 y con un suelo blando S_3 , las menores aceleraciones de piso se obtuvieron al utilizar el sistema conformado por dispositivos de triple péndulo de fricción (TFP), teniendo como máximos resultados aceleraciones de 160.49 cm/seg² (0.164g) en el eje X y 161.58 cm/seg² (0.165g) en el eje Y sin considerar la interacción suelo estructura, y aceleraciones de 171.25 cm/s² (0.175g) en el eje X y 168.26 cm/seg² (0.172g) en el eje Y considerando la interacción suelo estructura, todos en el último nivel. Estos resultados son en cierta medida similares a los encontrados en la presente investigación, sin embargo, son menores a los mostrados en la tabla 61 para el sistema TFP. Las posibles causas de esta diferencia en los resultados podrían deberse a la zona sísmica y al tipo de suelo de cimentación,

ya que Chacón (2018) analizó una edificación que se encuentra en la zona sísmica 3, que es menos demandante, emplazada sobre un suelo blando, el cual se caracteriza por aumentar el periodo fundamental de la superestructura, lo cual pudo haber influido en menores aceleraciones de piso.

Desplazamiento máximo del sistema de aislamiento (D_{TM})

Los resultados mostrados en la tabla 62 indicaron que los mayores desplazamientos promedio del sistema LRB+SL fueron de 0.196m en el eje X y de 0.215m en el eje Y, del sistema LRB+HDR+SL fueron de 0.188 m en el eje X y de 0.205m en el eje Y, y del sistema TFP fueron de 0.202m en el eje X y de 0.243m en el eje Y, donde se observó que al usar dispositivos TFP se obtuvieron los mayores desplazamientos. Melendrez y Pantoja (2020) mencionan que al comparar cuatro sistemas de aislamiento en una edificación aporticada, de trece niveles, de uso comercial, ubicada en la zona sísmica 4 y con un suelo rígido S_1 , los mayores desplazamientos del sistema de aislamiento se obtuvieron al utilizar el sistema conformado por dispositivos TFP, teniendo como máximos resultados desplazamientos de 18.23 in (46.30 cm) en el eje X y 21.10 in (53.59 cm) en el eje Y. Estos resultados son en cierta medida similares a los encontrados en la presente investigación, sin embargo, son mayores a los mostrados en la tabla 62 para el sistema TFP. Una de las posibles causas de esta diferencia en los resultados podría deberse a las configuraciones de las edificaciones utilizadas, ya que Melendrez y Pantoja (2020) analizaron una edificación mucho más alta y por ende con un periodo fundamental mayor, lo que pudo haber inducido en mayores desplazamientos del sistema de aislamiento.

Por otro lado, Chacón (2018) menciona que al comparar tres sistemas de aislamiento en una edificación aporticada, de cuatro niveles, de uso hospitalario, ubicada en la zona sísmica 3 y con un suelo blando S_3 , los mayores desplazamientos del sistema de aislamiento se obtuvieron al utilizar el sistema conformado por dispositivos TFP, teniendo como máximos

resultados desplazamientos de 43.74 cm en el eje X y 43.63 cm en el eje Y sin considerar la interacción suelo estructura, y desplazamientos de 40.18 cm en el eje X y 40.13 cm en el eje Y considerando la interacción suelo estructura. Estos resultados son en cierta medida similares a los encontrados en la presente investigación, sin embargo, son mayores a los mostrados en la tabla 62 para el sistema TFP. La posible causas de esta diferencia en los resultados podrían deberse al tipo de suelo de cimentación, ya que Chacón (2018) analizó una edificación que se encuentra cimentada sobre suelo blando, el cual se caracteriza por amplificar los desplazamientos del terreno ante la acción sísmica, lo que pudo haber inducido en mayores desplazamientos del sistema de aislamiento.

Fuerza cortante en la base de la superestructura aislada (V_s)

Los resultados mostrados en la tabla 63 indicaron que las mayores fuerzas cortantes promedio en la base de la estructura sobre el sistema LRB+SL fueron de 935.65 tonf en el eje X y de 985.68 tonf en el eje Y, para el sistema LRB+HDR+SL fueron de 943.99 tonf en el eje X y de 974.94 tonf en el eje Y, y para el sistema TFP fueron de 925.97 tonf en el eje X y de 962.66 tonf en el eje Y, donde se observó que al usar dispositivos TFP se obtuvieron las menores fuerzas cortantes en la base de la estructura sobre el sistema de aislamiento. Melendrez y Pantoja (2020) mencionan que al comparar cuatro sistemas de aislamiento en una edificación aporticada, de trece niveles, de uso comercial, ubicada en la zona sísmica 4 y con un suelo rígido S_1 , las menores fuerzas cortantes en la base de la estructura sobre el sistema de aislamiento se obtuvieron al utilizar el sistema conformado por dispositivos TFP, teniendo como resultado la fuerza cortante de 4175.45 Klb (1893.95 tonf). Este resultado es en cierta medida similar a los encontrados en la presente investigación, sin embargo, son mayores a los mostrados en la tabla 63 para el sistema TFP. Una de las posibles causas de esta diferencia en los resultados podría deberse a las configuraciones de las edificaciones utilizadas, ya que Melendrez y Pantoja (2020) analizaron una edificación con mayores dimensiones y por ende

mayor peso, lo que influye directamente en el incremento de las fuerzas cortantes en la base de la estructura sobre el sistema de aislamiento.

Fuerza cortante en el sistema de aislamiento (V_b)

Los resultados mostrados en la tabla 64 indicaron que las mayores fuerzas cortantes promedio en el sistema LRB+SL fueron de 952.37 tonf en el eje X y de 1011.04 tonf en el eje Y, para el sistema LRB+HDR+SL fueron de 957.65 tonf en el eje X y de 1028.32 tonf en el eje Y, y para el sistema TFP fueron de 938.09 tonf en el eje X y de 1005.46 tonf en el eje Y, donde se observó que al usar dispositivos TFP se obtuvieron las menores fuerzas cortantes en el sistema de aislamiento. Melendrez y Pantoja (2020) mencionan que al comparar cuatro sistemas de aislamiento en una edificación aporticada, de trece niveles, de uso comercial, ubicada en la zona sísmica 4 y con un suelo rígido S_1 , las menores fuerzas cortantes en el sistema de aislamiento se obtuvieron al utilizar el sistema conformado por dispositivos TFP, teniendo como resultado la fuerza cortante de 4530.30 Klb (2054.91 tonf). Este resultado es en cierta medida similar a los encontrados en la presente investigación, sin embargo, son mayores a los mostrados en la tabla 64 para el sistema TFP. Una de las posibles causas de esta diferencia en los resultados podría deberse a que Melendrez y Pantoja (2020) analizaron una edificación con mayores dimensiones y por ende mayor peso, lo que influye directamente en el incremento de las fuerzas cortantes en el sistema de aislamiento.

VI. CONCLUSIONES

- 6.1. En esta investigación se definió que las derivas máximas promedio de entrepiso de la edificación hospitalaria ubicada en la ciudad de Ilo son influenciadas positivamente debido al uso de los tres sistemas de aislamiento, ya que en todos los casos las derivas son menores a los límites establecidos en la Norma E.031 (MVCS, 2020) y en el capítulo 5 del manual técnico HAZUS-MH MR4 (FEMA, 2003), encontrando que el sistema LRB+HDR+SL presenta máximas derivas mayores en un 13.97% en el eje X y 10.89% en el eje Y respecto al sistema TFP, y que el sistema LRB+SL presenta máximas derivas mayores en un 20.00% en el eje X y 13.14% en el eje Y respecto al sistema TFP, concluyendo que el sistema TFP presenta las menores derivas de entrepiso, lo cual se puede observar en la tabla 54 y las figuras 73 y 74.
- 6.2. En esta investigación se estableció que las aceleraciones máximas promedio de piso de la edificación hospitalaria ubicada en la ciudad de Ilo son influenciadas positivamente debido al uso de los tres sistemas de aislamiento en la mayoría de niveles de la superestructura con la excepción de la azotea y el nivel de base para el caso de los sistemas LRB+HDR+SL y LRB+SL debido a que superan el límite establecido en el capítulo 5 del manual técnico HAZUS-MH MR4 (FEMA, 2003), encontrando que el sistema LRB+HDR+SL presenta máximas aceleraciones mayores en un 36.49% en el eje X y 33.15% en el eje Y respecto al sistema TFP, y que el sistema LRB+SL presenta máximas aceleraciones mayores en un 39.62% en el eje X y 35.77% en el eje Y respecto al sistema TFP, concluyendo que el sistema TFP presenta las menores aceleraciones de piso y cumple los con límites establecidos en el capítulo 5 del manual técnico HAZUS-MH MR4 (FEMA, 2003) en todos los niveles de la superestructura, lo cual se puede observar en la tabla 61 y las figuras 81 y 82.
- 6.3. En esta investigación se determinó que los desplazamientos máximos promedio del sistema de aislamiento de la edificación hospitalaria ubicada en la ciudad de Ilo son influenciados

significativamente debido al uso de los tres sistemas de aislamiento, encontrando que el sistema LRB+HDR+SL presenta desplazamientos menores en un 6.91% en el eje X y 15.69% en el eje Y respecto al sistema TFP, y que el sistema LRB+SL presenta desplazamientos menores en un 2.94% en el eje X y 11.24% en el eje Y respecto al sistema TFP, concluyendo que el sistema TFP presenta los mayores desplazamientos en el sistema de aislamiento, lo cual se puede observar en la tabla 62 y las figuras 85 y 86.

6.4. En esta investigación se precisó que las fuerzas cortantes máximas promedio en la base de la estructura sobre el sistema de aislamiento de la edificación hospitalaria ubicada en la ciudad de Ilo son influenciados significativamente debido al uso de los tres sistemas de aislamiento, encontrando que el sistema LRB+HDR+SL presenta fuerzas cortantes mayores en un 1.95% en el eje X y 1.28% en el eje Y respecto al sistema TFP, y que el sistema LRB+SL presenta fuerzas cortantes mayores en un 1.05% en el eje X y 2.39% en el eje Y respecto al sistema TFP, concluyendo que el sistema TFP presenta las menores fuerzas cortantes en la base de la superestructura aislada, lo cual se puede observar en la tabla 63 y las figuras 89 y 90.

6.5. En esta investigación se calculó que las fuerzas cortantes máximas promedio actuantes en el sistema de aislamiento de la edificación hospitalaria ubicada en la ciudad de Ilo son influenciados significativamente debido al uso de los tres sistemas de aislamiento, encontrando que el sistema LRB+HDR+SL presenta fuerzas cortantes mayores en un 2.09% en el eje X y 2.27% en el eje Y respecto al sistema TFP, y que el sistema LRB+SL presenta fuerzas cortantes mayores en un 1.52% en el eje X y 0.56% en el eje Y respecto al sistema TFP, concluyendo que el sistema TFP presenta las menores fuerzas cortantes en el sistema de aislamiento, lo cual se puede observar en la tabla 64 y las figuras 93 y 94.

6.6. En esta investigación se determinó que los tres sistemas de aislamiento analizados influyen positivamente en las respuestas estructurales de la edificación hospitalaria ubicada en la

ciudad de Ilo, permitiendo un mejor comportamiento de la edificación, donde las menores derivas de entrepiso se obtuvieron al usar el sistema TFP (véase la tabla 54), las menores aceleraciones de piso se obtuvieron al usar el sistema TFP (véase la tabla 61), los mayores desplazamientos del sistema de aislamiento se obtuvieron al usar el sistema TFP (véase la tabla 62), las menores fuerzas cortantes en la base de la superestructura aislada se obtuvieron al usar el sistema TFP (véase la tabla 63) y las menores fuerzas cortantes en el sistema de aislamiento se obtuvieron al usar el sistema TFP (véase la tabla 64). Finalmente, se concluyó que las mejores respuestas estructurales de la edificación hospitalaria sísmicamente aislada se obtuvieron al usar el sistema conformado por dispositivos de triple péndulo de fricción (TFP).

VII. RECOMENDACIONES

- 7.1 Se recomienda que, al diseñar un sistema de aislamiento sísmico, este lo conformen varios tipos de aisladores, ya que de esta manera se puede controlar mejor la rigidez efectiva de los dispositivos y del sistema de aislamiento, permitiendo a su vez un mejor control del levantamiento local producto de las fuerzas de tracción vertical en estos dispositivos, así como las derivas de entrepiso, aceleraciones de piso, desplazamiento máximo del sistema de aislamiento, fuerza cortante en la base de la superestructura aislada y fuerza cortante en el sistema de aislamiento.
- 7.2 En el caso de la presencia de fuerzas de tracción vertical en los aisladores, es recomendable la reducción de los peraltes de las vigas de los pórticos que se encuentran directamente sobre estos, sin embargo, se debe tener en cuenta que al aplicar este criterio las derivas de entrepiso podrían incrementarse.
- 7.3 Se recomienda que la Norma E.031 incluya un apartado sobre los límites de las aceleraciones de piso en edificaciones sísmicamente aisladas ya que un adecuado control de este tipo de aceleraciones permitiría reducir los daños en elementos no estructurales, elementos estructurales que no conformen el sistema de resistencia sísmica y el contenido de edificaciones, teniendo en cuenta que hasta la fecha de la publicación de este trabajo no se especifica ninguna consideración al respecto.
- 7.4 Para la reducción de aceleraciones de piso es recomendable el uso de losas macizas y el incremento de su espesor de ser necesario, sin embargo, el incremento del peso de la losa podría incrementar las derivas de entrepiso, las fuerzas cortantes en la base de la superestructura aislada y las fuerzas cortantes en el sistema de aislamiento.
- 7.5 Proseguir la investigación con otros tipos de dispositivos de aislamiento como es el caso de aisladores elastoméricos de caucho natural, aisladores de quintuple péndulo de fricción, entre otros.

- 7.6 Estudiar las respuestas estructurales de edificaciones sísmicamente aisladas con diferentes tipos de configuraciones irregulares, incluyendo las extremas.
- 7.7 Investigar las respuestas estructurales de edificaciones sísmicamente aisladas cimentadas sobre suelos blandos.
- 7.8 Estudiar la interacción suelo estructura en la respuesta estructural de edificaciones sísmicamente aisladas sobre diferentes estratos de suelo.
- 7.9 Realizar análisis dinámico no lineal tiempo-historia en edificaciones sísmicamente aisladas considerando sismos de campo cercano, los cuales ocurren a una distancia menor a 20 km del epicentro.

VIII. REFERENCIAS

- Aguilar, W. (2020). *Estudio geotécnico con fines de cimentación superficial para una vivienda unifamiliar ubicada en el parque industrial, Pampa Inalámbrica, Ilo, 2020*. [Tesis de pregrado, Universidad José Carlos Mariátegui]. Repositorio Institucional UJCM. https://repositorio.ujcm.edu.pe/bitstream/20.500.12819/1903/1/Wilber_tesis_titulo_2022.pdf
- Barbosa, R., Álvarez, J. y Carrillo, J. (2018). Aceleraciones de piso para diseño de elementos no estructurales y estructurales que no hacen parte del sistema de resistencia sísmica en edificios. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 17(33), pp. 99-119. <https://doi.org/10.22395/rium.v17n33a5>
- Blanco, A. (1994). *Estructuración y diseño de edificaciones de concreto armado*. Colegio de Ingenieros del Perú.
- Bridgestone. (octubre de 2022). *Seismic isolation product line up*. https://www.bridgestone.com/products/diversified/antiseismic_rubber/
- Cabezas, E., Andrade, D. y Torres, J. (2018). *Introducción a la metodología de la investigación científica*. Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. <https://institutorambell.blogspot.com/2022/12/introduccion-la-metodologia-de-la.html>
- Calvi, P. y Calvi, G. (2018). Historical development of friction-based seismic isolation systems. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 106(12), pp. 14-30. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2017.12.003>
- Chacón, C. (2018). *Eficiencia de respuesta sísmica de la infraestructura del hospital materno infantil de la ciudad de Juliaca, diseñado con aisladores de base considerando la flexibilidad del suelo*. [Tesis de pregrado, Universidad Peruana Unión]. Repositorio Institucional UPEU. <http://repositorio.upeu.edu.pe/handle/20.500.12840/851>

- Chen, B., Dai, J., Song, T. y Guan, Q. (2022). Research and development of high-performance high-damping rubber Materials for high-damping rubber isolation bearings: A review. *Polymers*, 14(12), pp. 1-36. <https://doi.org/10.3390/polym14122427>
- Constantinou, M., Kalpakidis, I., Filiatrault, A. y Lay, R. (2011). *LRFD-based analysis and design procedures for bridge bearings and seismic isolators*. University at Buffalo. <https://www.eng.buffalo.edu/mceer-reports/11/11-0004.pdf>
- De Domenico, D., Ricciardi, G. y Zhang, R. (2020). Optimal design and seismic performance of tuned fluid inerter applied to structures with friction pendulum isolators. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 13(2), pp. 1-17. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2020.106099>
- Escobar-Pérez, J. y Cuervo-Martínez, Á. (2008). Validez de contenido y juicio de expertos: una aproximación a su utilización. *Avances en medición*, 6(1), pp. 27-36. https://www.humanas.unal.edu.co/lab_psicometria/application/files/9416/0463/3548/Vol_6_Articulo3_Juicio_de_expertos_27-36.pdf
- Federal Emergency Management Agency. (2003). *Multi-hazard Loss Estimation Methodology, Earthquake Model HAZUS-MH MR4 Technical Manual*. http://www.civil.ist.utl.pt/~mlopes/conteudos/DamageStates/hazus_mr4_earthquake_tech_manual.pdf
- Genatios, C. y Lafuente, M. (2016). *Introducción al uso de aisladores y disipadores en estructuras*. CAF Banco de Desarrollo de América Latina y el Caribe. <https://scioteca.caf.com/handle/123456789/1213>
- Guaygua, B. (2015). *Análisis experimental y analítico de aisladores elastoméricos*. [Tesis de maestría, Universidad Central del Ecuador]. Repositorio Institucional UCE. <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/4239>

- Hernández, R., Fernández, C. y Baptista, M. (2014). *Metodología de la Investigación*. (6ª ed.). McGraw Hill.
- Janampa, B. (2018). *Diseño del sistema de aislamiento sísmico de un edificio hospitalario usando dispositivos HDR*. [Tesis de pregrado, Pontificia Universidad Católica del Perú]. Repositorio Institucional PUCP. <http://hdl.handle.net/20.500.12404/13234>
- Leiva, P. y Aguiar, R. (2018). Análisis no lineal del aislador de triple péndulo de fricción mediante el modelo tri-lineal. *Ciencia*, 19(1), pp. 95-119. <https://doi.org/10.24133/ciencia.v19i1.329>
- López, C., Retamales, R. y Kannegeisser, T. (10 noviembre de 2011). *Protección sísmica de estructuras, sistemas de aislación sísmica y disipación de energía*. Corporación de Desarrollo Tecnológico, Cámara Chilena de la Construcción. https://www.cdt.cl/?post_type=dln_download&p=76545
- Mamani, F. (2023). *Análisis comparativo de la respuesta estructural de edificaciones de forma regular e irregular con zapatas aisladas en el distrito de San Miguel, San Román, Puno, 2021*. [Tesis de pregrado, Universidad Continental]. Repositorio Institucional UC. <https://hdl.handle.net/20.500.12394/13455>
- McVitty, W. y Constantinou, M. (2015). *Property modification factors for seismic isolators: design guidance for buildings*. University at Buffalo. <https://www.eng.buffalo.edu/mceer-reports/15/15-0005.pdf>
- Melendrez, J. y Pantoja, C. (2020). *Análisis comparativo de un edificio con cuatro tipos de aisladores sísmicos en el distrito de la Victoria*. [Tesis de pregrado, Universidad Ricardo Palma]. Repositorio Institucional URP. <https://repositorio.urp.edu.pe/entities/publication/553abc92-7100-4d75-80cb-a6a3dd9ff9a1>

- Mendo, A. (2015). *Bases para la implementación de la norma peruana de análisis y diseño de edificios con aislación sísmica*. [Tesis de maestría, Pontificia Universidad Católica del Perú]. Repositorio Institucional PUCP. <http://hdl.handle.net/20.500.12404/6817>
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2020a). *Norma E.020 Cargas*.
<https://drive.google.com/file/d/15atg-9w0OEXjR5C1m6IXUFihwYeUh1aN/view>
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2020b). *Norma E.030 Diseño Sismorresistente*.
<https://drive.google.com/file/d/1W14N6JldWPN8wUZSqWZnUpHg6C559bi-/view>
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2020c). *Norma E.031 Aislamiento Sísmico*.
<https://drive.google.com/file/d/1IZ22Z1h3jfZpp4GKdsLLFQ1FIVSUVUso/view>
- Moscoso, J. (2019). *Evaluación del desempeño de edificaciones hospitalarias prefabricadas con aislamiento sísmico en el Perú*. [Tesis de maestría, Pontificia Universidad Católica del Perú]. Repositorio Institucional PUCP. <http://hdl.handle.net/20.500.12404/14990>
- Takagi, J. y Wada, A. (2019). Recent earthquakes and the need for a new philosophy for earthquake-resistant design. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 119(45), pp. 499-507. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2017.11.024>
- Talavera, A. (2017). *Experiencia nacional en edificaciones con sistemas de protección sísmica*. Recuperado el 15 de enero del 2022 de [http://www3.vivienda.gob.pe/dnc/archivos/difusion/eventos/2017/5.Experiencia Nacional en Sist. de protec. sísmica \(Alvaro Talavera\).pdf](http://www3.vivienda.gob.pe/dnc/archivos/difusion/eventos/2017/5.Experiencia Nacional en Sist. de protec. sísmica (Alvaro Talavera).pdf)
- Tavera, H. (2017). *Actualización del escenario por sismo, tsunami y exposición en la región central del Perú*. Instituto Geofísico del Perú. <http://hdl.handle.net/20.500.12816/781>
- Tipula, C. (2024). *Análisis comparativo del comportamiento estructural de una edificación multifamiliar con reforzamiento sísmico mediante tres tipos de aisladores, Juliaca-*

2023. [Tesis de pregrado, Universidad Privada de Tacna]. Repositorio Institucional UPT. <https://repositorio.upt.edu.pe/handle/20.500.12969/3460>
- Vaiana, N., Capuano, R., Sessa, S., Marmo, F. y Rosati, L. (2021). Nonlinear dynamic analysis of seismically base-isolated structures by a novel opensees hysteretic material model. *Applied Sciences*, 11(3), pp. 1-13. <https://doi.org/10.3390/app11030900>
- Valerio, J. (2015). *Análisis comparativo de un edificio fijo en la base vs un edificio aislado utilizando 4 tipos de aisladores sísmicos*. [Tesis de maestría, Universidad Politécnica de Cataluña]. Repositorio Institucional UPC. <http://hdl.handle.net/2117/80231>
- Villagómez, D. (2015). *Lineamientos para el análisis y diseño de edificaciones sísmicamente aisladas en el Perú*. [Tesis de maestría, Pontificia Universidad Católica del Perú]. Repositorio Institucional PUCP. <http://hdl.handle.net/20.500.12404/6729>
- Villavicencio, E. (2015). *Análisis sísmico estructural comparativo para edificios con aisladores de base tipo elastoméricos y friccionantes, para los diferentes tipos de suelos del Ecuador*. [Tesis de maestría, Escuela Politécnica Nacional]. Repositorio Institucional EPN. <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/15639>

IX. ANEXOS

ANEXO A: MATRIZ DE CONSISTENCIA

TÍTULO: EVALUACIÓN DE LA RESPUESTA ESTRUCTURAL DE UNA EDIFICACIÓN HOSPITALARIA USANDO TRES SISTEMAS DE AISLAMIENTO SÍSMICO EN LA CIUDAD DE ILO-PERÚ

PROBLEMAS	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	DIMENSIÓN	INDICADORES
Problema general ¿En qué medida influye el uso de tres sistemas de aislamiento sísmico en la respuesta estructural de una edificación hospitalaria ubicada en la ciudad de Ilo?	Objetivo general Determinar en qué medida influye el uso de tres sistemas de aislamiento sísmico en la respuesta estructural de una edificación hospitalaria ubicada en la ciudad de Ilo.	Hipótesis general El sistema de aislamiento sísmico con dispositivos de triple péndulo de fricción (TFP) permitirá obtener mejores resultados en la respuesta estructural de la edificación hospitalaria evaluada, ubicada en la ciudad de Ilo.	Variable independiente - Tres sistemas de aislamiento sísmico	- Aisladores de triple péndulo de fricción (TFP)	- Rigidez efectiva (tonf/m) - Desplazamiento máximo de fase (m) - Fuerza característica (tonf) - Energía disipada en un ciclo de histéresis (tonf.m) - Energía de deformación máxima elástica (tonf.m) - Amortiguamiento efectivo (adimensional) - Fuerza máxima (tonf)
				- Aisladores elastoméricos de núcleo de plomo (LRB) + Deslizadores Planos de Fricción (SL)	- Rigidez efectiva (tonf/m) - Rigidez inicial (tonf/m) - Rigidez post-fluencia (tonf/m) - Fuerza característica (tonf) - Energía disipada en un ciclo de histéresis (tonf.m) - Energía de deformación máxima elástica (tonf.m) - Amortiguamiento efectivo (adimensional) - Fuerza de fluencia (tonf) - Fuerza máxima (tonf) - Desplazamiento de fluencia (m)
				- Aisladores elastoméricos de núcleo de plomo (LRB) + Aisladores elastoméricos de alto amortiguamiento (HDR) + Deslizadores Planos de Fricción (SL)	- Rigidez efectiva (tonf/m) - Rigidez inicial (tonf/m) - Rigidez post-fluencia (tonf/m) - Fuerza característica (tonf) - Energía disipada en un ciclo de histéresis (tonf.m) - Energía de deformación máxima elástica (tonf.m) - Amortiguamiento efectivo (adimensional) - Fuerza de fluencia (tonf) - Fuerza máxima (tonf) - Desplazamiento de fluencia (m)

TÍTULO: EVALUACIÓN DE LA RESPUESTA ESTRUCTURAL DE UNA EDIFICACIÓN HOSPITALARIA USANDO TRES SISTEMAS DE AISLAMIENTO SÍSMICO EN LA CIUDAD DE ILO-PERÚ

PROBLEMAS	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	DIMENSIÓN	INDICADORES
Problemas específicos	Objetivos específicos	Hipótesis específicas	Variable dependiente	- Respuesta sísmica de la superestructura	- Derivas de entrepiso (adimensional)
a) ¿De qué manera influye el uso de tres sistemas de aislamiento sísmico en las derivas de entrepiso de una edificación hospitalaria ubicada en la ciudad de Ilo?	a) Definir de qué manera influye el uso de tres sistemas de aislamiento sísmico en las derivas de entrepiso de una edificación hospitalaria ubicada en la ciudad de Ilo.	a) El sistema de aislamiento sísmico con dispositivos de triple péndulo de fricción (TFP) permitirá obtener mejores resultados en las derivas de entrepiso de la edificación hospitalaria evaluada, ubicada en la ciudad de Ilo.	- Respuesta estructural de una edificación hospitalaria		
b) ¿Cómo influye el uso de tres sistemas de aislamiento sísmico en las aceleraciones de piso de una edificación hospitalaria ubicada en la ciudad de Ilo?	b) Establecer cómo influye el uso de tres sistemas de aislamiento sísmico en las aceleraciones de piso de una edificación hospitalaria ubicada en la ciudad de Ilo.	b) El sistema de aislamiento sísmico con dispositivos de triple péndulo de fricción (TFP) permitirá obtener mejores resultados en las aceleraciones de piso de la edificación hospitalaria evaluada, ubicada en la ciudad de Ilo.			- Aceleraciones de piso (m/s ²)

**TÍTULO: EVALUACIÓN DE LA RESPUESTA ESTRUCTURAL DE UNA EDIFICACIÓN HOSPITALARIA USANDO TRES SISTEMAS DE AISLAMIENTO SÍSMICO
EN LA CIUDAD DE ILO-PERÚ**

PROBLEMAS	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	DIMENSIÓN	INDICADORES
c) ¿De qué modo influye el uso de tres sistemas de aislamiento sísmico en el desplazamiento máximo del sistema de aislamiento de una edificación hospitalaria ubicada en la ciudad de Ilo?	c) Determinar de qué modo influye el uso de tres sistemas de aislamiento sísmico en el desplazamiento máximo del sistema de aislamiento de una edificación hospitalaria ubicada en la ciudad de Ilo.	c) El sistema de aislamiento sísmico con dispositivos de triple péndulo de fricción (TFP) permitirá obtener mejores resultados en el desplazamiento máximo del sistema de aislamiento de la edificación hospitalaria evaluada, ubicada en la ciudad de Ilo.			- Fuerza cortante en la base de la superestructura aislada (tonf)
d) ¿Cuánto influye el uso de tres sistemas de aislamiento sísmico en la fuerza cortante que actúa en la base de la superestructura aislada de una edificación hospitalaria ubicada en la ciudad de Ilo?	d) Precisar cuánto influye el uso de tres sistemas de aislamiento sísmico en la fuerza cortante que actúa en la base de la superestructura aislada de una edificación hospitalaria ubicada en la ciudad de Ilo.	d) El sistema de aislamiento sísmico con dispositivos de triple péndulo de fricción (TFP) permitirá obtener mejores resultados en la fuerza cortante que actúa en la base de la superestructura aislada de la edificación hospitalaria evaluada, ubicada en la ciudad de Ilo.		- Respuesta sísmica del sistema de aislamiento	- Fuerza cortante en el sistema de aislamiento (tonf)

**TÍTULO: EVALUACIÓN DE LA RESPUESTA ESTRUCTURAL DE UNA EDIFICACIÓN HOSPITALARIA USANDO TRES SISTEMAS DE AISLAMIENTO SÍSMICO
EN LA CIUDAD DE ILO-PERÚ**

PROBLEMAS	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	DIMENSIÓN	INDICADORES
e) ¿En qué medida influye el uso de tres sistemas de aislamiento sísmico en la fuerza cortante que actúa en el sistema de aislamiento de una edificación hospitalaria ubicada en la ciudad de Ilo?	e) Calcular en qué medida influye el uso de tres sistemas de aislamiento sísmico en la fuerza cortante que actúa en el sistema de aislamiento de una edificación hospitalaria ubicada en la ciudad de Ilo.	e) El sistema de aislamiento sísmico con dispositivos de triple péndulo de fricción (TFP) permitirá obtener mejores resultados en la fuerza cortante que actúa en el sistema de aislamiento de la edificación hospitalaria evaluada, ubicada en la ciudad de Ilo.			- Desplazamiento máximo del sistema de aislamiento (m)

ANEXO B: MATRIZ OPERACIONAL

TÍTULO: EVALUACIÓN DE LA RESPUESTA ESTRUCTURAL DE UNA EDIFICACIÓN HOSPITALARIA USANDO TRES SISTEMAS DE AISLAMIENTO SÍSMICO EN LA CIUDAD DE ILO-PERÚ					
VARIABLES	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICION OPERACIONAL	DIMENSIÓN	INDICADORES	ESCALA DE MEDICIÓN
Variable independiente - Tres sistemas de aislamiento sísmico.	Los sistemas de aislamiento sísmico buscan evitar que la superestructura sufra daños producto de movimientos horizontales del terreno debido a sismos, concentrando los desplazamientos y deformaciones en los aisladores, priorizando su uso en edificaciones que deben mantener su operatividad durante y después a un sismo, como es el caso de hospitales (Genatios y Lafuente, 2016). La Norma E.031 (MVCS, 2020c, p. 10) indica que los sistemas de aislamiento sísmico están conformados por elementos estructurales como dispositivos de aislamiento, vigas, losas macizas, capiteles entre otros.	En esta variable se van a operar tres sistemas de aislamiento sísmico: LRB+SL, LRB+HDR+SL y TFP, los cuales serán analizados y diseñados según las indicaciones y requisitos mínimos de la Norma E.030 (MVCS, 2020b), la Norma E.031 (MVCS, 2020c) y el manual técnico HAZUS-MH MR4 (FEMA, 2003).	Aisladores de triple péndulo de fricción (TFP)	- Rigidez efectiva (tonf/m) - Desplazamiento máximo de fase (m) - Fuerza característica (tonf) - Energía disipada en un ciclo de histéresis (tonf.m) - Energía de deformación máxima elástica (tonf.m) - Amortiguamiento efectivo (adimensional) - Fuerza máxima (tonf)	De razón
			- Aisladores elastoméricos de núcleo de plomo (LRB) + Deslizadores Planos de Fricción (SL)	- Rigidez efectiva (tonf/m) - Rigidez inicial (tonf/m) - Rigidez post-fluencia (tonf/m) - Fuerza característica (tonf) - Energía disipada en un ciclo de histéresis (tonf.m) - Energía de deformación máxima elástica (tonf.m) - Amortiguamiento efectivo (adimensional) - Fuerza de fluencia (tonf) - Fuerza máxima (tonf) - Desplazamiento de fluencia (m)	De razón
			- Aisladores elastoméricos de núcleo de plomo (LRB) + Aisladores elastoméricos de alto amortiguamiento (HDR) + Deslizadores Planos de Fricción (SL)	- Rigidez efectiva (tonf/m) - Rigidez inicial (tonf/m) - Rigidez post-fluencia (tonf/m) - Fuerza característica (tonf) - Energía disipada en un ciclo de histéresis (tonf.m) - Energía de deformación máxima elástica (tonf.m) - Amortiguamiento efectivo (adimensional) - Fuerza de fluencia (tonf) - Fuerza máxima (tonf) - Desplazamiento de fluencia (m)	De razón

TÍTULO: EVALUACIÓN DE LA RESPUESTA ESTRUCTURAL DE UNA EDIFICACIÓN HOSPITALARIA USANDO TRES SISTEMAS DE AISLAMIENTO SÍSMICO EN LA CIUDAD DE ILO-PERÚ					
VARIABLES	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICION OPERACIONAL	DIMENSIÓN	INDICADORES	ESCALA DE MEDICIÓN
Variable dependiente - Respuesta estructural de una edificación hospitalaria.	La respuesta estructural de una edificación es la manera en que una estructura responde ante la acción de fuerzas externas que actúan sobre ella (Mamani, 2021).	En esta variable se desarrollarán modelos numéricos en software de la edificación hospitalaria con los tres sistemas de aislamiento sísmico y se realizará el análisis dinámico no lineal tiempo-historia hasta obtener los indicadores derivas de entepiso, aceleraciones de piso, fuerza cortante en la base de la superestructura aislada, fuerza cortante en el sistema de aislamiento y desplazamiento máximo del sistema de aislamiento, los cuales serán comparados entre cada sistema de aislamiento sísmico para obtener las conclusiones de la investigación.	Respuesta sísmica de la superestructura	Derivas de entepiso (adimensional)	De razón
			Respuesta sísmica del sistema de aislamiento	Aceleraciones de piso (m/s ²)	De razón
				Fuerza cortante en la base de la superestructura aislada (tonf)	De razón
				Fuerza cortante en el sistema de aislamiento (tonf)	De razón
				Desplazamiento máximo del sistema de aislamiento (m)	De razón

ANEXO C: DISEÑO DE LOS DISPOSITIVOS DE AISLAMIENTO

Diseño de los dispositivos que conforman el sistema de aislamiento LRB+SL

Tabla C1

Diseño nominal de los aisladores LRB

Descripción	Dispositivo			Unidad
	LRB-1	LRB-2	LRB-3	
Código del aislador del catálogo de Bridgestone	LH070G4 [E]	LH065G4 [D]	LH060G4 [E]	---
Cantidad de aisladores	12	20	4	und
Peso de servicio sobre cada aislador LRB (P_{serv})	289.64	168.89	100.53	tonf
Peso máximo sobre el aislador LRB (P_{max})	542.21	341.08	203.06	tonf
Módulo de corte de la goma al 100% (G_{eq})	39.26	39.26	39.26	tonf/m ²
Módulo aparente del plomo a cortante (α_p)	59.45	59.45	59.45	tonf/m ²
Peso del aislador LRB	0.82	0.74	0.67	tonf
Diámetro del aislador (D_o)	0.700	0.65	0.60	m
Área efectiva en el plano del aislador LRB (A_{ep})	0.3770	0.3240	0.2777	m ²
Altura total de la goma (H)	0.202	0.198	0.200	m
Número de capas de goma	43	45	50	und
Espesor de cada capa de goma (t_r)	0.0047	0.0044	0.004	m
Altura total del aislador elegido LRB (H_T)	0.3883	0.3904	0.4079	m
Diámetro efectivo del núcleo de plomo (D_p)	0.10	0.10	0.08	m
Área efectiva del núcleo de plomo (A_p)	0.0079	0.0079	0.0050	m ²
Esfuerzo a corte de fluencia del plomo (σ_{pb})	812.41	812.41	812.41	tonf/m ²
Ratio de rigidez inicial y post-fluencia ($10 \leq \varepsilon \leq 15$)	13	13	13	---
Desplazamiento máximo (D_M)	0.272	0.272	0.272	m
Desplazamiento total máximo (D_{TM})	0.327	0.327	0.327	m
Deformación por corte (γ)	1.346	1.373	1.360	---
Rigidez post-fluencia (K_2)	72.93	64.11	53.98	tonf/m
Rigidez inicial (K_1)	948.15	833.47	701.73	tonf/m
Fuerza característica (Q)	6.38	6.38	4.08	tonf
Rigidez efectiva (K_{eff})	96.37	87.55	68.97	tonf/m

Descripción	Dispositivo			Unidad
	LRB-1	LRB-2	LRB-3	
Amortiguamiento horizontal (C_h)	10.76	8.96	4.54	tonf.s/m
Desplazamiento de fluencia (D_y)	0.00729	0.00829	0.00630	m
Energía disipada en un ciclo de histéresis (E_d)	6.75	6.73	4.34	tonf.m
Energía de deformación máxima elástica (E_s)	3.56	3.24	2.55	tonf.m
Amortiguamiento efectivo (β_{eff})	0.151	0.165	0.135	---
Fuerza de fluencia (F_y)	6.91	6.91	4.42	tonf
Fuerza máxima (F_M)	26.21	23.81	18.76	tonf
Factor B_M	1.35	1.40	1.31	---
Módulo de Young (E)	224.34	224.34	224.34	tonf/m ²
Módulo volumétrico (E_∞)	119919.07	119919.07	119919.07	tonf/m ²
Factor de corrección por rugosidad (k)	0.85	0.85	0.85	---
Primer factor de forma del material (S_1)	37.23	36.93	37.50	---
Segundo factor de forma del material (S_2)	3.46	3.28	3.00	---
Módulo de compresión efectiva de la goma (E_c)	119919.05	119919.05	119919.05	tonf/m ²
Factor de corrección al módulo de Young (α_v)	1.23	1.23	1.23	---
Rigidez a compresión vertical del aislador (K_v)	281020.43	247215.18	208511.44	tonf/m
Amortiguamiento vertical (C_v)	72.02	51.58	36.55	tonf.s/m
Verificación por capacidad axial				
Área reducida (A_r)	0.16	0.13	0.10	m ²
Factor forma (S)	36.48	36.06	36.83	---
Peso crítico del aislador (P_{cr})	907.98	664.82	466.81	tonf
Peso de servicio sobre cada aislador LRB (P_{serv})	289.64	168.89	100.53	tonf
P_{cr} / P_{serv}	3.13	3.94	4.64	---
Factor de seguridad para carga axial	3	3	3	---
Verificación por carga axial	OK	OK	OK	---
Peso máximo sobre el aislador LRB (P_{max})	542.21	341.08	203.06	tonf
P_{cr} / P_{max}	1.67	1.95	2.30	---
Factor de seguridad para carga axial última	1	1	1	---

Descripción	Dispositivo			Unidad
	LRB-1	LRB-2	LRB-3	
Verificación por carga axial última	OK	OK	OK	---
Verificación de deformaciones por corte				
Deformación por corte debido a deformación	1.62	1.65	1.63	---
Deformación por corte debido a compresión	3.21	2.37	1.91	---
Deformación por corte debido a deformación angular	1.94	1.82	1.69	---
Deformación total por corte	5.79	4.93	4.39	---
Límite de deformación total por corte	6	6	6	---
Verificación total por corte	OK	OK	OK	---

Tabla C2

Diseño en límite superior de los aisladores LRB

Descripción	Dispositivo			Unidad
	LRB-1	LRB-2	LRB-3	
Código del aislador del catálogo de Bridgestone	LH070G4 [E]	LH065G4 [D]	LH060G4 [E]	---
Desplazamiento máximo (D_M)	0.272	0.272	0.272	m
Desplazamiento total máximo (D_{TM})	0.327	0.327	0.327	m
Deformación por corte (γ)	1.346	1.373	1.360	---
Factor de modificación para K_2	1.3	1.3	1.3	---
Rigidez post-fluencia (K_2)	94.81	83.35	70.17	tonf/m
Rigidez inicial (K_1)	1232.59	1083.51	912.25	tonf/m
Factor de modificación para Q	1.5	1.5	1.5	---
Fuerza característica (Q)	9.57	9.57	6.13	tonf
Rigidez efectiva (K_{eff})	129.97	118.51	92.67	tonf/m
Amortiguamiento horizontal (C_h)	14.50	11.96	6.20	tonf.s/m
Desplazamiento de fluencia (D_y)	0.00841	0.00957	0.00727	m
Energía disipada en un ciclo de histéresis (E_d)	10.09	10.04	6.48	tonf.m
Energía de deformación máxima elástica (E_s)	4.81	4.38	3.43	tonf.m
Amortiguamiento efectivo (β_{eff})	0.167	0.182	0.151	---
Fuerza de fluencia (F_y)	10.37	10.37	6.64	tonf
Fuerza máxima (F_M)	35.35	32.23	25.21	tonf

Descripción	Dispositivo			Unidad
	LRB-1	LRB-2	LRB-3	
Factor B_M	1.40	1.45	1.35	---
Verificación por capacidad axial				
Área reducida (A_r)	0.16	0.13	0.10	m ²
Factor forma (S)	36.48	36.06	36.83	---
Peso crítico del aislador (P_{cr})	907.98	664.82	466.81	tonf
Peso de servicio sobre cada aislador LRB (P_{serv})	289.64	168.89	100.53	tonf
P_{cr} / P_{serv}	3.13	3.94	4.64	---
Factor de seguridad para carga axial	3	3	3	---
Verificación por carga axial	OK	OK	OK	---
Peso máximo sobre el aislador LRB (P_{max})	559.53	360.88	215.14	tonf
P_{cr} / P_{max}	1.62	1.84	2.17	---
Factor de seguridad para carga axial última	1	1	1	---
Verificación por carga axial última	OK	OK	OK	---
Verificación de deformaciones por corte				
Deformación por corte debido a deformación	1.62	1.65	1.63	---
Deformación por corte debido a compresión	3.21	2.37	1.91	---
Deformación por corte debido a deformación angular	1.94	1.82	1.69	---
Deformación total por corte	5.79	4.93	4.39	---
Límite de deformación total por corte	6	6	6	---
Verificación total por corte	OK	OK	OK	---

Tabla C3

Diseño en límite inferior de los aisladores LRB

Descripción	Dispositivo			Unidad
	LRB-1	LRB-2	LRB-3	
Código del aislador del catálogo de Bridgestone	LH070G4 [E]	LH065G4 [D]	LH060G4 [E]	---
Desplazamiento máximo (D_M)	0.272	0.272	0.272	m
Desplazamiento total máximo (D_{TM})	0.327	0.327	0.327	m
Deformación por corte (γ)	1.346	1.373	1.360	---

Descripción	Dispositivo			Unidad
	LRB-1	LRB-2	LRB-3	
Factor de modificación para K_2	0.8	0.8	0.8	---
Rigidez post-fluencia (K_2)	58.35	51.29	43.18	tonf/m
Rigidez inicial (K_1)	758.52	666.78	561.38	tonf/m
Factor de modificación para Q	0.8	0.8	0.8	---
Fuerza característica (Q)	5.10	5.10	3.27	tonf
Rigidez efectiva (K_{eff})	77.09	70.04	55.18	tonf/m
Amortiguamiento horizontal (C_h)	9.62	8.02	4.06	tonf.s/m
Desplazamiento de fluencia (D_y)	0.00729	0.00829	0.00630	m
Energía disipada en un ciclo de histéresis (E_d)	5.40	5.38	3.47	tonf.m
Energía de deformación máxima elástica (E_s)	2.85	2.59	2.04	tonf.m
Amortiguamiento efectivo (β_{eff})	0.151	0.165	0.135	---
Fuerza de fluencia (F_y)	5.53	5.53	3.54	tonf
Fuerza máxima (F_M)	20.97	19.05	15.01	tonf
Factor B_M	1.35	1.40	1.31	---
Verificación por capacidad axial				
Área reducida (A_r)	0.16	0.13	0.10	m ²
Factor forma (S)	36.48	36.06	36.83	---
Peso crítico del aislador (P_{cr})	907.98	664.82	466.81	tonf
Peso de servicio sobre cada aislador LRB (P_{serv})	289.64	168.89	100.53	tonf
P_{cr} / P_{serv}	3.13	3.94	4.64	---
Factor de seguridad para carga axial	3	3	3	---
Verificación por carga axial	OK	OK	OK	---
Peso máximo sobre el aislador LRB (P_{max})	531.73	329.22	195.78	tonf
P_{cr} / P_{max}	1.71	2.02	2.38	---
Factor de seguridad para carga axial última	1	1	1	---
Verificación por carga axial última	OK	OK	OK	---
Verificación de deformaciones por corte				
Deformación por corte debido a deformación	1.62	1.65	1.63	---
Deformación por corte debido a compresión	3.21	2.37	1.91	---

Descripción	Dispositivo			Unidad
	LRB-1	LRB-2	LRB-3	
Deformación por corte debido a deformación angular	1.94	1.82	1.69	---
Deformación total por corte	5.79	4.93	4.39	---
Límite de deformación total por corte	6	6	6	---
Verificación total por corte	OK	OK	OK	---

Tabla C4

Diseño nominal de los aisladores SL

Descripción	Dispositivo	Unidad
	SL	
Cantidad de aisladores	9	und
Desplazamiento máximo (D_M)	0.272	m
Desplazamiento total máximo (D_{TM})	0.327	m
Peso de servicio sobre cada aislador SL (P_{serv})	294.70	tonf
Peso máximo sobre el aislador SL (P_{max})	556.35	tonf
Coefficiente de fricción (μ)	5.00%	---
Fuerza de fluencia (F_y)	14.73	tonf
Fuerza característica (Q)	14.73	tonf
Fuerza máxima (F_M)	14.73	tonf
Rigidez efectiva (K_{eff})	54.17	tonf/m
Energía disipada en un ciclo de histéresis (E_d)	16.03	tonf.m
Energía de deformación máxima elástica (E_s)	2.00	tonf.m
Amortiguamiento efectivo (β_{eff})	63.66%	---
Desplazamiento de fluencia (D_y)	0.001	m
Rigidez inicial (K_1)	14734.95	tonf/m
Coefficiente de amortiguamiento horizontal (C_h)	47.34	tonf.s/m
Esfuerzo axil permisible en el teflón (σ_s)	2039.44	tonf/m ²
Esfuerzo axil permisible en combinación del teflón (σ_u)	4078.88	tonf/m ²
Área del teflón 1	0.14	m ²
Área del teflón 2	0.14	m ²
Área final del teflón (el mayor de 1 y 2)	0.14	m ²
Diámetro de la placa de teflón (D)	0.43	m
Diámetro total del POT (D_T)	0.48	m
Rigidez vertical (K_v)	384309.54	tonf/m
Coefficiente de amortiguamiento vertical (C_v)	339.78	tonf.s/m

Tabla C5*Diseño en límite superior de los aisladores SL*

Descripción	Dispositivo SL	Unidad
Factor de modificación	1.6	---
Coeficiente de fricción modificado (μ_{mod})	8.00%	---
Fuerza de fluencia (F_y)	23.58	tonf
Fuerza característica (Q)	23.58	tonf
Fuerza máxima (F_M)	23.58	tonf
Rigidez efectiva (K_{eff})	86.68	tonf/m
Energía disipada en un ciclo de histéresis (E_d)	25.64	tonf.m
Energía de deformación máxima elástica (E_s)	3.21	tonf.m
Amortiguamiento efectivo (β_{eff})	63.66%	---
Desplazamiento de fluencia (D_y)	0.001	m
Rigidez inicial (K_1)	23575.93	tonf/m
Coeficiente de amortiguamiento horizontal (C_h)	59.88	tonf.s/m
Esfuerzo axil permisible en el teflón (σ_s)	2039.44	tonf/m ²
Esfuerzo axil permisible en combinación del teflón (σ_u)	4078.88	tonf/m ²
Área del teflón 1	0.14	m ²
Área del teflón 2	0.14	m ²
Área final del teflón (el mayor de 1 y 2)	0.14	m ²
Diámetro de la placa de teflón (D)	0.43	m
Diámetro total del POT (D_T)	0.48	m
Rigidez vertical (K_v)	384309.54	tonf/m
Coeficiente de amortiguamiento vertical (C_v)	339.78	tonf.s/m

Tabla C6*Diseño en límite inferior de los aisladores SL*

Descripción	Dispositivo SL	Unidad
Factor de modificación	0.8	---
Coeficiente de fricción modificado (μ_{mod})	4.00%	---
Fuerza de fluencia (F_y)	11.79	tonf
Fuerza característica (Q)	11.79	tonf
Fuerza máxima (F_M)	11.79	tonf
Rigidez efectiva (K_{eff})	43.34	tonf/m

Descripción	Dispositivo SL	Unidad
Energía disipada en un ciclo de histéresis (E_d)	12.82	tonf.m
Energía de deformación máxima elástica (E_s)	1.60	tonf.m
Amortiguamiento efectivo (β_{eff})	63.66%	---
Desplazamiento de fluencia (D_y)	0.001	m
Rigidez inicial (K_1)	11787.96	tonf/m
Coeficiente de amortiguamiento horizontal (C_h)	42.34	tonf.s/m
Esfuerzo axil permisible en el teflón (σ_s)	2039.44	tonf/m ²
Esfuerzo axil permisible en combinación del teflón (σ_u)	4078.88	tonf/m ²
Área del teflón 1	0.14	m ²
Área del teflón 2	0.14	m ²
Área final del teflón (el mayor de 1 y 2)	0.14	m ²
Diámetro de la placa de teflón (D)	0.43	m
Diámetro total del POT (D_T)	0.48	m
Rigidez vertical (K_v)	384309.54	tonf/m
Coeficiente de amortiguamiento vertical (C_v)	339.78	tonf.s/m

Diseño de los dispositivos que conforman el sistema de aislamiento LRB+HDR+SL

Tabla C7

Diseño nominal de los aisladores LRB

Descripción	Dispositivo			Unidad
	LRB-1	LRB-2	LRB-3	
Código del aislador del catálogo de Bridgestone	LH070G4 [E]	LH065G4 [E]	LH060G4 [E]	---
Cantidad de aisladores	6	20	4	und
Peso de servicio sobre cada aislador LRB (P_{serv})	284.67	168.85	100.46	tonf
Peso máximo sobre el aislador LRB (P_{max})	530.32	334.70	200.62	tonf
Módulo de corte de la goma al 100% (G_{eq})	39.26	39.26	39.26	tonf/m ²
Módulo aparente del plomo a cortante (α_p)	59.45	59.45	59.45	tonf/m ²
Peso del aislador LRB	0.82	0.74	0.67	tonf
Diámetro del aislador (D_o)	0.700	0.65	0.60	m
Área efectiva en el plano del aislador LRB (A_{ep})	0.3770	0.3255	0.2777	m ²
Altura total de la goma (H)	0.202	0.198	0.200	m
Número de capas de goma	43	45	50	und
Espesor de cada capa de goma (t_r)	0.0047	0.0044	0.004	m
Altura total del aislador elegido LRB (H_T)	0.3883	0.3904	0.4079	m
Diámetro efectivo del núcleo de plomo (D_p)	0.10	0.09	0.08	m
Área efectiva del núcleo de plomo (A_p)	0.0079	0.0064	0.0050	m ²
Esfuerzo a corte de fluencia del plomo (σ_{pb})	812.41	812.41	812.41	tonf/m ²
Ratio de rigidez inicial y post-fluencia ($10 \leq \varepsilon \leq 15$)	13	13	13	---
Desplazamiento máximo (D_M)	0.267	0.267	0.267	m
Desplazamiento total máximo (D_{TM})	0.321	0.321	0.321	m
Deformación por corte (γ)	1.323	1.350	1.337	---
Rigidez post-fluencia (K_2)	73.08	64.10	54.09	tonf/m
Rigidez inicial (K_1)	950.08	833.28	703.16	tonf/m
Fuerza característica (Q)	6.38	5.17	4.08	tonf
Rigidez efectiva (K_{eff})	96.92	83.40	69.34	tonf/m

Descripción	Dispositivo			Unidad
	LRB-1	LRB-2	LRB-3	
Amortiguamiento horizontal (C_h)	10.87	7.11	4.63	tonf.s/m
Desplazamiento de fluencia (D_y)	0.00728	0.00672	0.00629	m
Energía disipada en un ciclo de histéresis (E_d)	6.64	5.39	4.26	tonf.m
Energía de deformación máxima elástica (E_s)	3.46	2.98	2.48	tonf.m
Amortiguamiento efectivo (β_{eff})	0.152	0.144	0.137	---
Fuerza de fluencia (F_y)	6.91	5.60	4.42	tonf
Fuerza máxima (F_M)	25.92	22.30	18.54	tonf
Factor B_M	1.36	1.33	1.31	---
Módulo de Young (E)	224.34	224.34	224.34	tonf/m ²
Módulo volumétrico (E_∞)	119919.07	119919.07	119919.07	tonf/m ²
Factor de corrección por rugosidad (k)	0.85	0.85	0.85	---
Primer factor de forma del material (S_1)	37.23	36.93	37.50	---
Segundo factor de forma del material (S_2)	3.46	3.28	3.00	---
Módulo de compresión efectiva de la goma (E_c)	119919.05	119919.05	119919.05	tonf/m ²
Factor de corrección al módulo de Young (α_v)	1.23	1.23	1.23	---
Rigidez a compresión vertical del aislador (K_v)	281020.43	247220.94	208511.44	tonf/m
Amortiguamiento vertical (C_v)	71.40	51.58	36.54	tonf.s/m
Verificación por capacidad axial				
Área reducida (A_r)	0.17	0.13	0.10	m ²
Factor forma (S)	36.48	36.23	36.83	---
Peso crítico del aislador (P_{cr})	925.61	682.97	479.34	tonf
Peso de servicio sobre cada aislador LRB (P_{serv})	284.67	168.85	100.46	tonf
P_{cr} / P_{serv}	3.25	4.04	4.77	---
Factor de seguridad para carga axial	3	3	3	---
Verificación por carga axial	OK	OK	OK	---
Peso máximo sobre el aislador LRB (P_{max})	530.32	334.70	200.62	tonf
P_{cr} / P_{max}	1.75	2.04	2.39	---
Factor de seguridad para carga axial última	1	1	1	---

Descripción	Dispositivo			Unidad
	LRB-1	LRB-2	LRB-3	
Verificación por carga axial última	OK	OK	OK	---
Verificación de deformaciones por corte				
Deformación por corte debido a deformación	1.59	1.62	1.61	---
Deformación por corte debido a compresión	3.09	2.32	1.86	---
Deformación por corte debido a deformación angular	1.94	1.82	1.69	---
Deformación total por corte	5.65	4.86	4.31	---
Límite de deformación total por corte	6	6	6	---
Verificación total por por corte	OK	OK	OK	---

Tabla C8

Diseño en límite superior de los aisladores LRB

Descripción	Dispositivo			Unidad
	LRB-1	LRB-2	LRB-3	
Código del aislador del catálogo de Bridgestone	LH070G4 [E]	LH065G4 [E]	LH060G4 [E]	---
Desplazamiento máximo (D_M)	0.267	0.267	0.267	m
Desplazamiento total máximo (D_{TM})	0.321	0.321	0.321	m
Deformación por corte (γ)	1.323	1.350	1.337	---
Factor de modificación para K_2	1.3	1.3	1.3	---
Rigidez post-fluencia (K_2)	95.01	83.33	70.32	tonf/m
Rigidez inicial (K_1)	1235.11	1083.27	914.11	tonf/m
Factor de modificación para Q	1.5	1.5	1.5	---
Fuerza característica (Q)	9.57	7.75	6.13	tonf
Rigidez efectiva (K_{eff})	130.77	112.29	93.20	tonf/m
Amortiguamiento horizontal (C_h)	14.64	9.64	6.32	tonf.s/m
Desplazamiento de fluencia (D_y)	0.00839	0.00775	0.00726	m
Energía disipada en un ciclo de histéresis (E_d)	9.91	8.05	6.37	tonf.m
Energía de deformación máxima elástica (E_s)	4.67	4.01	3.33	tonf.m
Amortiguamiento efectivo (β_{eff})	0.169	0.160	0.152	---
Fuerza de fluencia (F_y)	10.37	8.40	6.64	tonf
Fuerza máxima (F_M)	34.97	30.03	24.92	tonf

Descripción	Dispositivo			Unidad
	LRB-1	LRB-2	LRB-3	
Factor B_M	1.41	1.38	1.36	---
Verificación por capacidad axial				
Área reducida (A_r)	0.17	0.13	0.10	m ²
Factor forma (S)	36.48	36.23	36.83	---
Peso crítico del aislador (P_{cr})	925.61	682.97	479.34	tonf
Peso de servicio sobre cada aislador LRB (P_{serv})	284.67	168.85	100.46	tonf
P_{cr} / P_{serv}	3.25	4.04	4.77	---
Factor de seguridad para carga axial	3	3	3	---
Verificación por carga axial	OK	OK	OK	---
Peso máximo sobre el aislador LRB (P_{max})	551.80	358.53	215.16	tonf
P_{cr} / P_{max}	1.68	1.90	2.23	---
Factor de seguridad para carga axial última	1	1	1	---
Verificación por carga axial última	OK	OK	OK	---
Verificación de deformaciones por corte				
Deformación por corte debido a deformación	1.59	1.62	1.61	---
Deformación por corte debido a compresión	3.09	2.32	1.86	---
Deformación por corte debido a deformación angular	1.94	1.82	1.69	---
Deformación total por corte	5.65	4.86	4.31	---
Límite de deformación total por corte	6	6	6	---
Verificación total por corte	OK	OK	OK	---

Tabla C9

Diseño en límite inferior de los aisladores LRB

Descripción	Dispositivo			Unidad
	LRB-1	LRB-2	LRB-3	
Código del aislador del catálogo de Bridgestone	LH070G4 [E]	LH065G4 [E]	LH060G4 [E]	---
Desplazamiento máximo (D_M)	0.267	0.267	0.267	m
Desplazamiento total máximo (D_{TM})	0.321	0.321	0.321	m
Deformación por corte (γ)	1.323	1.350	1.337	---

Descripción	Dispositivo			Unidad
	LRB-1	LRB-2	LRB-3	
Factor de modificación para K_2	0.8	0.8	0.8	---
Rigidez post-fluencia (K_2)	58.47	51.28	43.27	tonf/m
Rigidez inicial (K_1)	760.07	666.63	562.53	tonf/m
Factor de modificación para Q	0.8	0.8	0.8	---
Fuerza característica (Q)	5.10	4.13	3.27	tonf
Rigidez efectiva (K_{eff})	77.53	66.72	55.47	tonf/m
Amortiguamiento horizontal (C_h)	9.72	6.36	4.14	tonf.s/m
Desplazamiento de fluencia (D_y)	0.00728	0.00672	0.00629	m
Energía disipada en un ciclo de histéresis (E_d)	5.31	4.31	3.41	tonf.m
Energía de deformación máxima elástica (E_s)	2.77	2.38	1.98	tonf.m
Amortiguamiento efectivo (β_{eff})	0.152	0.144	0.137	---
Fuerza de fluencia (F_y)	5.53	4.48	3.54	tonf
Fuerza máxima (F_M)	20.73	17.84	14.83	tonf
Factor B_M	1.36	1.33	1.31	---
Verificación por capacidad axial				
Área reducida (A_r)	0.17	0.13	0.10	m ²
Factor forma (S)	36.48	36.23	36.83	---
Peso crítico del aislador (P_{cr})	925.61	682.97	479.34	tonf
Peso de servicio sobre cada aislador LRB (P_{serv})	284.67	168.85	100.46	tonf
P_{cr} / P_{serv}	3.25	4.04	4.77	---
Factor de seguridad para carga axial	3	3	3	---
Verificación por carga axial	OK	OK	OK	---
Peso máximo sobre el aislador LRB (P_{max})	520.55	323.52	193.82	tonf
P_{cr} / P_{max}	1.78	2.11	2.47	---
Factor de seguridad para carga axial última	1	1	1	---
Verificación por carga axial última	OK	OK	OK	---
Verificación de deformaciones por corte				
Deformación por corte debido a deformación	1.59	1.62	1.61	---
Deformación por corte debido a compresión	3.09	2.32	1.86	---

Descripción	Dispositivo			Unidad
	LRB-1	LRB-2	LRB-3	
Deformación por corte debido a deformación angular	1.94	1.82	1.69	---
Deformación total por corte	5.65	4.86	4.31	---
Límite de deformación total por corte	6	6	6	---
Verificación total por por corte	OK	OK	OK	---

Tabla C10

Diseño nominal de los aisladores HDR

Descripción	Dispositivo	Unidad
	HDR-1	
Código del aislador del catálogo de Bridgestone	HH080X4S (20cm)	---
Cantidad de aisladores	5	und
Peso de servicio sobre cada aislador HDR (P_{serv})	285.27	tonf
Peso máximo sobre el aislador HDR (P_{max})	538.40	tonf
Módulo de corte de la goma al 100% (G_{eq})	39.973024	tonf/m ²
Peso del aislador HDR	1.21	tonf
Diámetro externo del aislador (D_o)	0.80	m
Diámetro interno del aislador (D_i)	0.020	m
Altura total de la goma (H)	0.200	m
Número de capas de goma	37	und
Espesor de cada capa de goma (t_r)	0.0054	m
Altura total del aislador elegido HDR (H_T)	0.4222	m
Área efectiva en el plano del aislador HDR (A_{ep})	0.5023	m ²
Ratio de rigidez inicial y post-fluencia (ϵ)	10	---
Desplazamiento máximo (D_M)	0.267	m
Desplazamiento total máximo (D_{TM})	0.321	m
Deformación por corte (γ)	1.337	---
Módulo de corte de la goma equivalente ($G_{eq} [\gamma]$)	337.67	tonf/m ²
Amortiguamiento efectivo equivalente ($\beta_{eq[\gamma]}$)	0.243	---
Relación equivalente resistencia característica al cortante ($u_{eq[\gamma]}$)	0.415	---
Rigidez efectiva (K_{eff})	86.45	tonf/m
Rigidez post-fluencia (K_2)	50.61	tonf/m
Rigidez inicial (K_1)	506.05	tonf/m
Fuerza característica (Q)	9.59	tonf
Desplazamiento de fluencia (D_y)	0.0211	m

Descripción	Dispositivo	Unidad
	HDR-1	
Energía disipada en un ciclo de histéresis (E_d)	9.4468	tonf.m
Energía de deformación máxima elástica (E_s)	3.0900	tonf.m
Fuerza de fluencia (F_y)	10.66	tonf
Fuerza máxima (F_M)	23.12	tonf
Amortiguamiento efectivo (β_{eff})	0.243	---
Factor BM	1.59	---
Verificación por capacidad axial		
Área reducida (A_r)	0.25	m ²
Factor forma (S)	37.01	---
Peso crítico del aislador (P_{cr})	1428.53	tonf
Peso de servicio sobre cada aislador LRB (P_{serv})	285.27	tonf
P_{cr} / P_{serv}	5.01	---
Factor de seguridad para carga axial	3	---
Verificación por carga axial	OK	---
Peso máximo sobre el aislador LRB (P_{max})	538.40	tonf
P_{cr} / P_{max}	2.65	---
Factor de seguridad para carga axial última	1	---
Verificación por carga axial última	OK	---
Verificación de deformaciones por corte		
Deformación por corte debido a deformación	1.61	---
Deformación por corte debido a compresión	1.89	---
Deformación por corte debido a deformación angular	2.22	---
Deformación total por corte	4.61	---
Límite de deformación total por corte	6	---
Verificación total por corte	OK	---

Tabla C11

Diseño en límite superior de los aisladores HDR

Descripción	Dispositivo	Unidad
	HDR-1	
Código del aislador del catálogo de Bridgestone	HH080X4S (20cm)	---
Desplazamiento máximo (D_M)	0.267	m
Desplazamiento total máximo (D_{TM})	0.321	m
Deformación por corte (γ)	1.337	---
Módulo de corte de la goma equivalente ($G_{eq} [\gamma]$)	34.43	tonf/m
Factor de modificación para K_2	2	---

Descripción	Dispositivo	Unidad
	HDR-1	
Módulo de corte de la goma equivalente modificado ($G_{eq \text{ mod } [\gamma]}$)	68.87	tonf/m
Amortiguamiento efectivo equivalente ($\beta_{eq[\gamma]}$)	0.243	---
Relación equivalente resistencia característica al cortante $u_{eq[\gamma]}$	0.415	---
Rigidez efectiva (K_{eff})	172.90	tonf/m
Rigidez post-fluencia (K_2)	101.21	tonf/m
Rigidez inicial (K_1)	1012.11	tonf/m
Factor de modificación para Q	1.7	---
Fuerza característica (Q)	16.30	tonf
Desplazamiento de fluencia (D_y)	0.0179	m
Energía disipada en un ciclo de histéresis (E_d)	16.27	tonf.m
Energía de deformación máxima elástica (E_s)	6.18	tonf.m
Fuerza de fluencia (F_y)	18.11	tonf
Fuerza máxima (F_M)	43.36	tonf
Amortiguamiento efectivo (β_{eff})	0.209	---
Factor B_M	1.52	---
Verificación por capacidad axial		
Área reducida (A_r)	0.25	m ²
Factor forma (S)	37.01	---
Peso crítico del aislador (P_{cr})	2857.07	tonf
Peso de servicio sobre cada aislador LRB (P_{serv})	285.27	tonf
P_{cr} / P_{serv}	10.02	---
Factor de seguridad para carga axial	3	---
Verificación por carga axial	OK	---
Peso máximo sobre el aislador LRB (P_{max})	563.84	tonf
P_{cr} / P_{max}	5.07	---
Factor de seguridad para carga axial última	1	---
Verificación por carga axial última	OK	---
Verificación de deformaciones por corte		
Deformación por corte debido a deformación	1.61	---
Deformación por corte debido a compresión	1.89	---
Deformación por corte debido a deformación angular	2.22	---
Deformación total por corte	4.61	---
Límite de deformación total por corte	6	---
Verificación total por corte	OK	---

Tabla C12

Diseño en límite inferior de los aisladores HDR

Descripción	Dispositivo	Unidad
	HDR-1	
Código del aislador del catálogo de Bridgestone	HH080X4S (20cm)	---
Desplazamiento máximo (D_M)	0.267	m
Desplazamiento total máximo (D_{TM})	0.321	m
Deformación por corte (γ)	1.337	---
Módulo de corte de la goma equivalente ($G_{eq[\gamma]}$)	34.43	tonf/m
Factor de modificación para K_2	0.8	---
Módulo de corte de la goma equivalente modificado ($G_{eq\ mod[\gamma]}$)	27.55	tonf/m
Amortiguamiento efectivo equivalente ($\beta_{eq[\gamma]}$)	0.243	---
Relación equivalente resistencia característica al cortante $u_{eq[\gamma]}$	0.415	---
Rigidez efectiva (K_{eff})	69.16	tonf/m
Rigidez post-fluencia (K_2)	40.48	tonf/m
Rigidez inicial (K_1)	404.84	tonf/m
Factor de modificación para Q	0.80	---
Fuerza característica (Q)	7.67	tonf
Desplazamiento de fluencia (D_y)	0.0211	m
Energía disipada en un ciclo de histéresis (E_d)	7.5575	tonf.m
Energía de deformación máxima elástica (E_s)	2.4720	tonf.m
Fuerza de fluencia (F_y)	8.52	tonf
Fuerza máxima (F_M)	18.49	tonf
Amortiguamiento efectivo (β_{eff})	0.243	---
Factor B_M	1.59	---
Verificación por capacidad axial		
Área reducida (A_r)	0.25	m ²
Factor forma (S)	37.01	---
Peso crítico del aislador (P_{cr})	1142.83	tonf
Peso de servicio sobre cada aislador LRB (P_{serv})	285.27	tonf
P_{cr} / P_{serv}	4.01	---
Factor de seguridad para carga axial	3	---
Verificación por carga axial	OK	---
Peso máximo sobre el aislador LRB (P_{max})	526.77	tonf
P_{cr} / P_{max}	2.17	---

Descripción	Dispositivo	Unidad
	HDR-1	
Factor de seguridad para carga axial última	1	---
Verificación por carga axial última	OK	---
Verificación de deformaciones por corte		
Deformación por corte debido a deformación	1.61	---
Deformación por corte debido a compresión	1.89	---
Deformación por corte debido a deformación angular	2.22	---
Deformación total por corte	4.61	---
Límite de deformación total por corte	6	---
Verificación total por corte	OK	---

Tabla C13

Diseño nominal de los aisladores SL

Descripción	Dispositivo	Unidad
	SL	
Cantidad de aisladores	10	und
Desplazamiento máximo (D_M)	0.267	m
Desplazamiento total máximo (D_{TM})	0.321	m
Peso de servicio sobre cada aislador SL (P_{serv})	294.70	tonf
Peso máximo sobre el aislador SL (P_{max})	548.72	tonf
Coeficiente de fricción (μ)	5.00%	---
Fuerza de fluencia (F_y)	14.73	tonf
Fuerza característica (Q)	14.73	tonf
Fuerza máxima (F_M)	14.73	tonf
Rigidez efectiva (K_{eff})	55.10	tonf/m
Energía disipada en un ciclo de histéresis (E_d)	15.76	tonf.m
Energía de deformación máxima elástica (E_s)	1.97	tonf.m
Amortiguamiento efectivo (β_{eff})	63.66%	---
Desplazamiento de fluencia (D_y)	0.001	m
Rigidez inicial (K_1)	14734.95	tonf/m
Coeficiente de amortiguamiento horizontal (C_h)	47.74	tonf.s/m
Esfuerzo axil permisible en el teflón (σ_s)	2039.44	tonf/m ²
Esfuerzo axil permisible en combinación del teflón (σ_u)	4078.88	tonf/m ²
Área del teflón 1	0.14	m ²
Área del teflón 2	0.13	m ²
Área final del teflón (el mayor de 1 y 2)	0.14	m ²

Descripción	Dispositivo SL	Unidad
Diámetro de la placa de teflón (D)	0.43	m
Diámetro total del POT (D _T)	0.48	m
Rigidez vertical (K _v)	384309.54	tonf/m
Coefficiente de amortiguamiento vertical (C _v)	339.78	tonf.s/m

Tabla C14

Diseño en límite superior de los aisladores SL

Descripción	Dispositivo SL	Unidad
Factor de modificación	1.6	---
Coefficiente de fricción modificado (μ_{mod})	8.00%	---
Fuerza de fluencia (F _y)	23.58	tonf
Fuerza característica (Q)	23.58	tonf
Fuerza máxima (F _M)	23.58	tonf
Rigidez efectiva (K _{eff})	88.16	tonf/m
Energía disipada en un ciclo de histéresis (E _d)	25.21	tonf.m
Energía de deformación máxima elástica (E _s)	3.15	tonf.m
Amortiguamiento efectivo (β_{eff})	63.66%	---
Desplazamiento de fluencia (D _y)	0.001	m
Rigidez inicial (K ₁)	23575.93	tonf/m
Coefficiente de amortiguamiento horizontal (C _h)	60.39	tonf.s/m
Esfuerzo axil permisible en el teflón (σ_s)	2039.44	tonf/m ²
Esfuerzo axil permisible en combinación del teflón (σ_u)	4078.88	tonf/m ²
Área del teflón 1	0.14	m ²
Área del teflón 2	0.13	m ²
Área final del teflón (el mayor de 1 y 2)	0.14	m ²
Diámetro de la placa de teflón (D)	0.43	m
Diámetro total del POT (D _T)	0.48	m
Rigidez vertical (K _v)	384309.54	tonf/m
Coefficiente de amortiguamiento vertical (C _v)	339.78	tonf.s/m

Tabla C15*Diseño en límite inferior de los aisladores SL*

Descripción	Dispositivo SL	Unidad
Factor de modificación	0.8	---
Coeficiente de fricción modificado (μ_{mod})	4.00%	---
Fuerza de fluencia (F_y)	11.79	tonf
Fuerza característica (Q)	11.79	tonf
Fuerza máxima (F_M)	11.79	tonf
Rigidez efectiva (K_{eff})	44.08	tonf/m
Energía disipada en un ciclo de histéresis (E_d)	12.60	tonf.m
Energía de deformación máxima elástica (E_s)	1.58	tonf.m
Amortiguamiento efectivo (β_{eff})	63.66%	---
Desplazamiento de fluencia (D_y)	0.001	m
Rigidez inicial (K_1)	11787.96	tonf/m
Coeficiente de amortiguamiento horizontal (C_h)	42.70	tonf.s/m
Esfuerzo axil permisible en el teflón (σ_s)	2039.44	tonf/m ²
Esfuerzo axil permisible en combinación del teflón (σ_u)	4078.88	tonf/m ²
Área del teflón 1	0.14	m ²
Área del teflón 2	0.13	m ²
Área final del teflón (el mayor de 1 y 2)	0.14	m ²
Diámetro de la placa de teflón (D)	0.43	m
Diámetro total del POT (D_T)	0.48	m
Rigidez vertical (K_v)	384309.54	tonf/m
Coeficiente de amortiguamiento vertical (C_v)	339.78	tonf.s/m

Diseño de los dispositivos que conforman el sistema de aislamiento TFP

Tabla C16

Diseño nominal de los aisladores TFP

Descripción	Dispositivo			Unidad
	TFP-1	TFP-2	TFP-3	
Cantidad de aisladores	21	20	4	und
Peso de servicio sobre cada aislador LRB (P_{serv})	300.65	167.11	97.22	tonf
Desplazamientos máximos (D_M)	0.269	0.269	0.269	m
Coeficiente de fricción Plato 01 (μ_1)	1.30%	8.00%	10.00%	---
Coeficiente de fricción Plato 02 (μ_2)	1.00%	4.00%	8.00%	---
Coeficiente de fricción Plato 03 (μ_3)	1.00%	4.00%	8.00%	---
Coeficiente de fricción Plato 04 (μ_4)	1.30%	8.00%	10.00%	---
Radio efectivo del plato 1 (R_{eff1})	2.694	1.600	1.242	m
Radio efectivo del plato 2 (R_{eff2})	0.300	0.200	0.150	m
Radio efectivo del plato 3 (R_{eff3})	0.300	0.200	0.150	m
Radio efectivo del plato 4 (R_{eff4})	2.694	1.600	1.242	m
Fuerza de fricción del plato 1 (F_{f1})	3.908	13.369	9.722	tonf
Fuerza de fricción del plato 1 (F_{f2})	3.006	6.684	7.778	tonf
Fuerza de fricción del plato 1 (F_{f3})	3.006	6.684	7.778	tonf
Fuerza de fricción del plato 1 (F_{f4})	3.908	13.369	9.722	tonf
Desplazamiento curvo del plato 1 (d_1^*)	0.134	0.127	0.132	m
Desplazamiento curvo del plato 2 (d_2^*)	0.001	0.008	0.003	m
Desplazamiento curvo del plato 3 (d_3^*)	0.001	0.008	0.003	m
Desplazamiento curvo del plato 4 (d_4^*)	0.134	0.127	0.132	m
Suma de alturas de los platos 1 y 4 ($h_1 + h_4$)	0.210	0.210	0.210	m
Suma de alturas de los platos 2 y 3 ($h_2 + h_3$)	0.150	0.150	0.150	m
Altura del plato 1 (h_1)	0.105	0.105	0.105	m
Altura del plato 2 (h_2)	0.075	0.075	0.075	m
Altura del plato 3 (h_3)	0.075	0.075	0.075	m
Altura del plato 4 (h_4)	0.105	0.105	0.105	m
Radio de curvatura del plato 1 (R_1)	2.799	1.705	1.347	m
Radio de curvatura del plato 2 (R_2)	0.375	0.275	0.225	m
Radio de curvatura del plato 3 (R_3)	0.375	0.275	0.225	m

Descripción	Dispositivo			Unidad
	TFP-1	TFP-2	TFP-3	
Radio de curvatura del plato 4 (R_4)	2.799	1.705	1.347	m
Desplazamiento horizontal del plato 1 (d_1)	0.1390	0.1350	0.1428	m
Desplazamiento horizontal del plato 2 (d_2)	0.0011	0.0110	0.0045	m
Desplazamiento horizontal del plato 3 (d_3)	0.0011	0.0110	0.0045	m
Desplazamiento horizontal del plato 4 (d_4)	0.1390	0.1350	0.1428	m
Cálculo de la rigidez vertical de los aisladores TFP				
Módulo de elasticidad del acero (E)	20000000	20000000	20000000	tonf/m ²
Área transversal del deslizador rígido (A_R)	0.018	0.018	0.018	m ²
Altura del deslizador rígido (h_R)	0.150	0.15	0.15	m
Rigidez vertical del TFP (K_v)	2356194.5	2356194.5	2356194.5	tonf/m
FASE 01				
Desplazamiento máximo de la Fase 01 (D_{u1})	0.0018	0.0160	0.0060	m
Fuerza máxima en la Fase 01 (F_{M1})	3.91	13.37	9.72	tonf
Fuerza de activación del dispositivo en la Fase 01 (Q_1)	3.01	6.68	7.78	tonf
Rigidez efectiva en la Fase 01 (K_{eff1})	2171.35	835.55	1620.41	tonf/m
Energía disipada en un ciclo de activación en la Fase 01 (E_{d1})	0.022	0.428	0.187	tonf.m
Energía elástica de deformación máxima en la Fase 01 (E_{s1})	0.004	0.107	0.029	tonf.m
Amortiguamiento efectivo en la Fase 01 (β_1)	48.97%	31.83%	50.93%	---
FASE 02				
Desplazamiento máximo de la Fase 02 (D_{u2})	0.2694	0.2694	0.2694	m
Fuerza máxima en la Fase 02 (F_{M2})	18.84	26.60	20.03	tonf
Fuerza de activación del dispositivo en la Fase 02 (Q_2)	3.73	11.88	9.30	tonf
Rigidez efectiva en la Fase 02 (K_{eff2})	69.94	98.75	74.35	tonf/m
Energía disipada en un ciclo de activación en la Fase 02 (E_{D2})	4.098	13.131	10.182	tonf.m
Energía elástica de deformación máxima en la Fase 02 (E_{s2})	2.538	3.583	2.698	tonf.m
Amortiguamiento efectivo en la Fase 02 (β_2)	12.85%	29.16%	30.03%	---
Desplazamiento de fluencia (D_v)	0.00090	0.00800	0.00300	m
Amortiguamiento horizontal (C_v)	7.268	19.820	13.591	tonf.s/m
FASE 03				
Desplazamiento máximo de la Fase 03 (D_{u3})	0.2694	0.2694	0.2694	m

Descripción	Dispositivo			Unidad
	TFP-1	TFP-2	TFP-3	
Fuerza máxima en la Fase 03 (F_{M3})	18.84	26.60	20.03	tonf
Fuerza de activación del dispositivo en la Fase 03 (Q_{d3})	3.81	12.53	9.49	tonf
Rigidez efectiva en la Fase 03 ($K_{eff\ 3}$)	69.94	98.75	74.35	tonf/m
Energía disipada en un ciclo de activación en la Fase 03 (E_{D3})	4.141	13.986	10.556	tonf.m
Energía elástica de deformación máxima en la Fase 03 (E_{S3})	2.538	3.583	2.698	tonf.m
Amortiguamiento efectivo en la Fase 03 (β_3)	12.98%	31.06%	31.14%	---

Tabla C17

Diseño en límite superior de los aisladores TFP

Descripción	Dispositivo			Unidad
	TFP-1	TFP-2	TFP-3	
Cantidad de aisladores	21	20	4	und
Peso de servicio sobre cada aislador LRB (P_{serv})	300.65	167.11	97.22	tonf
Desplazamientos máximos (D_M)	0.269	0.269	0.269	m
Factor de modificación para μ	1.6	1.6	1.6	---
Coeficiente de fricción Plato 01 (μ_1)	2.08%	12.80%	16.00%	---
Coeficiente de fricción Plato 02 (μ_2)	1.60%	6.40%	12.80%	---
Coeficiente de fricción Plato 03 (μ_3)	1.60%	6.40%	12.80%	---
Coeficiente de fricción Plato 04 (μ_4)	2.08%	12.80%	16.00%	---
Radio efectivo del plato 1 ($Reff_1$)	2.694	1.600	1.242	m
Radio efectivo del plato 2 ($Reff_2$)	0.300	0.200	0.150	m
Radio efectivo del plato 3 ($Reff_3$)	0.300	0.200	0.150	m
Radio efectivo del plato 4 ($Reff_4$)	2.694	1.600	1.242	m
Fuerza de fricción del plato 1 (F_{f1})	6.253	21.390	15.556	tonf
Fuerza de fricción del plato 1 (F_{f2})	4.810	10.695	12.445	tonf
Fuerza de fricción del plato 1 (F_{f3})	4.810	10.695	12.445	tonf
Fuerza de fricción del plato 1 (F_{f4})	6.253	21.390	15.556	tonf
Desplazamiento curvo del plato 1 (d_1^*)	0.134	0.127	0.132	m
Desplazamiento curvo del plato 2 (d_2^*)	0.001	0.008	0.003	m
Desplazamiento curvo del plato 3 (d_3^*)	0.001	0.008	0.003	m
Desplazamiento curvo del plato 4 (d_4^*)	0.134	0.127	0.132	m

Descripción	Dispositivo			Unidad
	TFP-1	TFP-2	TFP-3	
Suma de alturas de los platos 1 y 4 ($h_1 + h_4$)	0.210	0.210	0.210	m
Suma de alturas de los platos 2 y 3 ($h_2 + h_3$)	0.150	0.150	0.150	m
Altura del plato 1 (h_1)	0.105	0.105	0.105	m
Altura del plato 2 (h_2)	0.075	0.075	0.075	m
Altura del plato 3 (h_3)	0.075	0.075	0.075	m
Altura del plato 4 (h_4)	0.105	0.105	0.105	m
Radio de curvatura del plato 1 (R_1)	2.799	1.705	1.347	m
Radio de curvatura del plato 2 (R_2)	0.375	0.275	0.225	m
Radio de curvatura del plato 3 (R_3)	0.375	0.275	0.225	m
Radio de curvatura del plato 4 (R_4)	2.799	1.705	1.347	m
Desplazamiento horizontal del plato 1 (d_1)	0.139	0.135	0.143	m
Desplazamiento horizontal del plato 2 (d_2)	0.001	0.011	0.005	m
Desplazamiento horizontal del plato 3 (d_3)	0.001	0.011	0.005	m
Desplazamiento horizontal del plato 4 (d_4)	0.139	0.135	0.143	m
Cálculo de la rigidez vertical de los aisladores TFP				
Módulo de elasticidad del acero (E)	200000000	200000000	200000000	tonf/m ²
Área transversal del deslizador rígido (A_R)	0.018	0.018	0.018	m ²
Altura del deslizador rígido (h_R)	0.150	0.15	0.15	m
Rigidez vertical del TFP (K_v)	2356194.5	2356194.5	2356194.5	tonf/m
FASE 01				
Desplazamiento máximo de la Fase 01 (D_{u1})	0.0029	0.0256	0.0096	m
Fuerza máxima en la Fase 01 (F_{M1})	6.25	21.39	15.56	tonf
Fuerza de activación del dispositivo en la Fase 01 (Q_1)	4.81	10.69	12.44	tonf
Rigidez efectiva en la Fase 01 (K_{eff1})	2171.35	835.55	1620.41	tonf/m
Energía disipada en un ciclo de activación en la Fase 01 (E_{d1})	0.055	1.095	0.478	tonf.m
Energía elástica de deformación máxima en la Fase 01 (E_{s1})	0.009	0.274	0.075	tonf.m
Amortiguamiento efectivo en la Fase 01 (β_1)	48.97%	31.83%	50.93%	---

Descripción	Dispositivo			Unidad
	TFP-1	TFP-2	TFP-3	
FASE 02				
Desplazamiento máximo de la Fase 02 (D_{u2})	0.2705	0.2790	0.2730	m
Fuerza máxima en la Fase 02 (F_{M2})	21.19	34.62	25.86	tonf
Fuerza de activación del dispositivo en la Fase 02 (Q_2)	5.96	19.01	14.89	tonf
Rigidez efectiva en la Fase 02 ($K_{eff\ 2}$)	78.33	124.10	94.74	tonf/m
Energía disipada en un ciclo de activación en la Fase 02 (E_{D2})	6.577	21.420	16.471	tonf.m
Energía elástica de deformación máxima en la Fase 02 (E_{S2})	2.865	4.830	3.530	tonf.m
Amortiguamiento efectivo en la Fase 02 (β_2)	18.27%	35.29%	37.13%	---
Desplazamiento de fluencia (D_v)	0.00144	0.01280	0.00480	m
Amortiguamiento horizontal (C_v)	13.001	27.857	19.690	tonf.s/m
FASE 03				
Desplazamiento máximo de la Fase 03 (D_{u3})	0.2694	0.2694	0.2694	m
Fuerza máxima en la Fase 03 (F_{M3})	20.64	30.61	24.70	tonf
Fuerza de activación del dispositivo en la Fase 03 (Q_{d3})	6.09	20.05	15.18	tonf
Rigidez efectiva en la Fase 03 ($K_{eff\ 3}$)	76.63	113.63	91.68	tonf/m
Energía disipada en un ciclo de activación en la Fase 03 (E_{D3})	6.688	23.610	17.427	tonf.m
Energía elástica de deformación máxima en la Fase 03 (E_{S3})	2.781	4.123	3.326	tonf.m
Amortiguamiento efectivo en la Fase 03 (β_3)	19.14%	45.57%	41.69%	---

Tabla C18

Diseño en límite inferior de los aisladores TFP

Descripción	Dispositivo			Unidad
	TFP-1	TFP-2	TFP-3	
Cantidad de aisladores	21	20	4	und
Peso de servicio sobre cada aislador LRB (P_{serv})	300.65	167.11	97.22	tonf
Desplazamientos máximos (D_M)	0.269	0.269	0.269	m
Factor de modificación para μ	0.8	0.8	0.8	---

Descripción	Dispositivo			Unidad
	TFP-1	TFP-2	TFP-3	
Coeficiente de fricción Plato 01 (μ_1)	1.04%	6.40%	8.00%	---
Coeficiente de fricción Plato 02 (μ_2)	0.80%	3.20%	6.40%	---
Coeficiente de fricción Plato 03 (μ_3)	0.80%	3.20%	6.40%	---
Coeficiente de fricción Plato 04 (μ_4)	1.04%	6.40%	8.00%	---
Radio efectivo del plato 1 (R_{eff1})	2.694	1.600	1.242	m
Radio efectivo del plato 2 (R_{eff2})	0.300	0.200	0.150	m
Radio efectivo del plato 3 (R_{eff3})	0.300	0.200	0.150	m
Radio efectivo del plato 4 (R_{eff4})	2.694	1.600	1.242	m
Fuerza de fricción del plato 1 (F_{f1})	3.127	10.695	7.778	tonf
Fuerza de fricción del plato 1 (F_{f2})	2.405	5.347	6.222	tonf
Fuerza de fricción del plato 1 (F_{f3})	2.405	5.347	6.222	tonf
Fuerza de fricción del plato 1 (F_{f4})	3.127	10.695	7.778	tonf
Desplazamiento curvo del plato 1 (d_1^*)	0.134	0.127	0.132	m
Desplazamiento curvo del plato 2 (d_2^*)	0.001	0.008	0.003	m
Desplazamiento curvo del plato 3 (d_3^*)	0.001	0.008	0.003	m
Desplazamiento curvo del plato 4 (d_4^*)	0.134	0.127	0.132	m
Suma de alturas de los platos 1 y 4 ($h_1 + h_4$)	0.210	0.210	0.210	m
Suma de alturas de los platos 2 y 3 ($h_2 + h_3$)	0.150	0.150	0.150	m
Altura del plato 1 (h_1)	0.105	0.105	0.105	m
Altura del plato 2 (h_2)	0.075	0.075	0.075	m
Altura del plato 3 (h_3)	0.075	0.075	0.075	m
Altura del plato 4 (h_4)	0.105	0.105	0.105	m
Radio de curvatura del plato 1 (R_1)	2.799	1.705	1.347	m
Radio de curvatura del plato 2 (R_2)	0.375	0.275	0.225	m
Radio de curvatura del plato 3 (R_3)	0.375	0.275	0.225	m
Radio de curvatura del plato 4 (R_4)	2.799	1.705	1.347	m
Desplazamiento horizontal del plato 1 (d_1)	0.139	0.135	0.143	m
Desplazamiento horizontal del plato 2 (d_2)	0.001	0.011	0.005	m
Desplazamiento horizontal del plato 3 (d_3)	0.001	0.011	0.005	m
Desplazamiento horizontal del plato 4 (d_4)	0.139	0.135	0.143	m

Descripción	Dispositivo			Unidad
	TFP-1	TFP-2	TFP-3	
Cálculo de la rigidez vertical de los aisladores TFP				
Módulo de elasticidad del acero (E)	200000000	200000000	200000000	tonf/m ²
Área transversal del deslizador rígido (A _R)	0.018	0.018	0.018	m ²
Altura del deslizador rígido (h _R)	0.150	0.150	0.150	m
Rigidez vertical del TFP (K _v)	2356194.5	2356194.5	2356194.5	tonf/m
FASE 01				
Desplazamiento máximo de la Fase 01 (D _{u1})	0.0014	0.0128	0.0048	m
Fuerza máxima en la Fase 01 (F _{M1})	3.13	10.69	7.78	tonf
Fuerza de activación del dispositivo en la Fase 01 (Q ₁)	2.41	5.35	6.22	tonf
Rigidez efectiva en la Fase 01 (K _{eff1})	2171.35	835.55	1620.41	tonf/m
Energía disipada en un ciclo de activación en la Fase 01 (E _{d1})	0.014	0.274	0.119	tonf.m
Energía elástica de deformación máxima en la Fase 01 (E _{s1})	0.002	0.068	0.019	tonf.m
Amortiguamiento efectivo en la Fase 01 (β ₁)	48.97%	31.83%	50.93%	---
FASE 02				
Desplazamiento máximo de la Fase 02 (D _{u2})	0.2690	0.2662	0.2682	m
Fuerza máxima en la Fase 02 (F _{M2})	18.06	23.93	18.09	tonf
Fuerza de activación del dispositivo en la Fase 02 (Q ₂)	2.98	9.51	7.44	tonf
Rigidez efectiva en la Fase 02 (K _{eff 2})	67.13	89.89	67.44	tonf/m
Energía disipada en un ciclo de activación en la Fase 02 (E _{D2})	3.275	10.436	8.116	tonf.m
Energía elástica de deformación máxima en la Fase 02 (E _{S2})	2.429	3.185	2.425	tonf.m
Amortiguamiento efectivo en la Fase 02 (β ₂)	10.73%	26.08%	26.63%	---
Desplazamiento de fluencia (D _y)	0.00072	0.00640	0.00240	m
Amortiguamiento horizontal (C _v)	5.195	16.496	11.185	tonf.s/m
FASE 03				
Desplazamiento máximo de la Fase 03 (D _{u3})	0.2694	0.2694	0.2694	m
Fuerza máxima en la Fase 03 (F _{M3})	18.24	25.26	18.47	tonf

Descripción	Dispositivo			Unidad
	TFP-1	TFP-2	TFP-3	
Fuerza de activación del dispositivo en la Fase 03 (Q_{d3})	3.05	10.03	7.59	tonf
Rigidez efectiva en la Fase 03 ($K_{eff\ 3}$)	67.71	93.78	68.58	tonf/m
Energía disipada en un ciclo de activación en la Fase 03 (E_{D3})	3.302	10.984	8.355	tonf.m
Energía elástica de deformación máxima en la Fase 03 (E_{S3})	2.457	3.403	2.488	tonf.m
Amortiguamiento efectivo en la Fase 03 (β_3)	10.70%	25.69%	26.72%	---

ANEXO D: LAZOS HISTERÉTICOS DE LOS AISLADORES

Lazos histeréticos de dispositivos del sistema de aislamiento LRB+SL

Figura D1

Lazo histerético de dispositivo LRB 01 en límite superior en la dirección EW

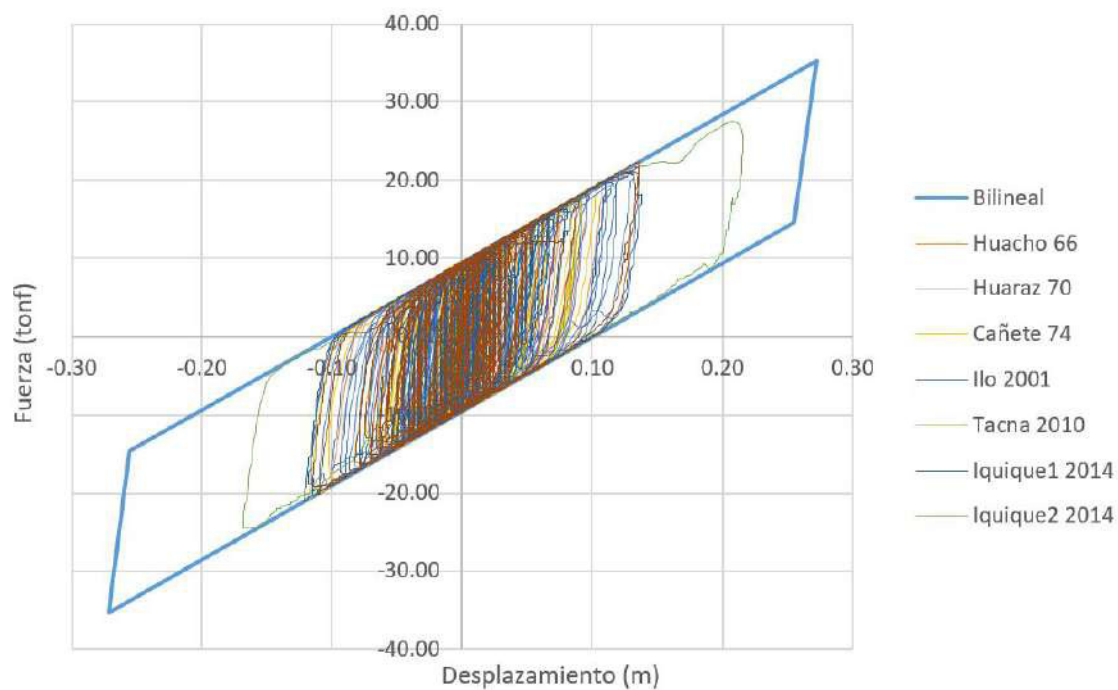


Figura D2

Lazo histerético de dispositivo LRB 01 en límite inferior en la dirección EW

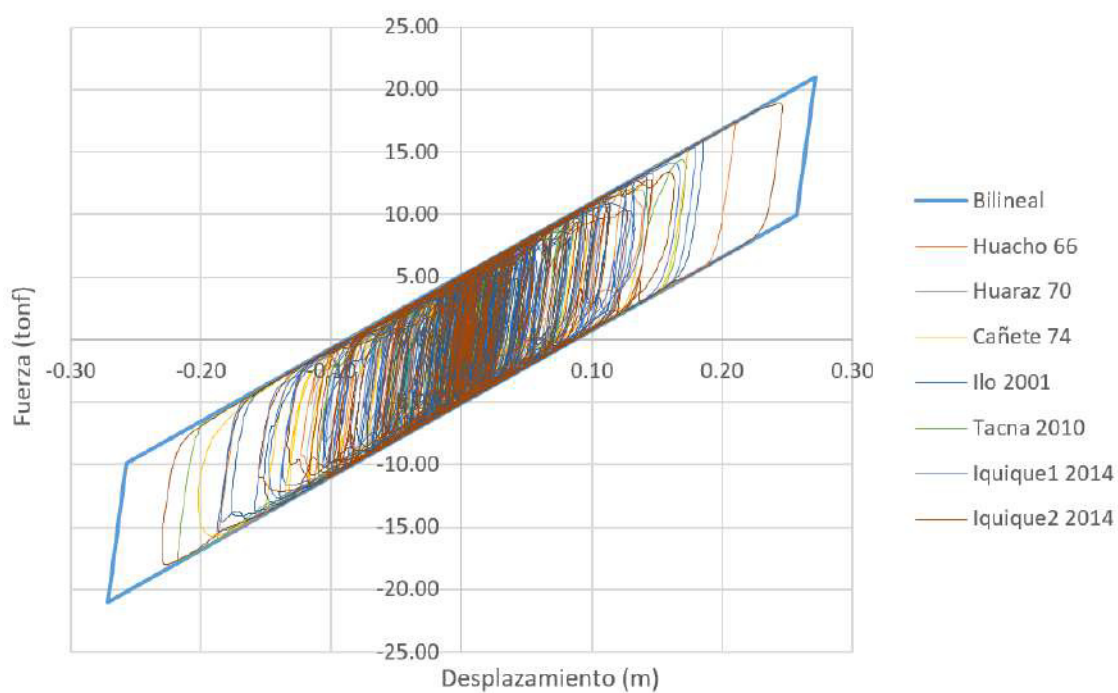


Figura D3

Lazo histerético de dispositivo LRB 01 en límite superior en la dirección NS

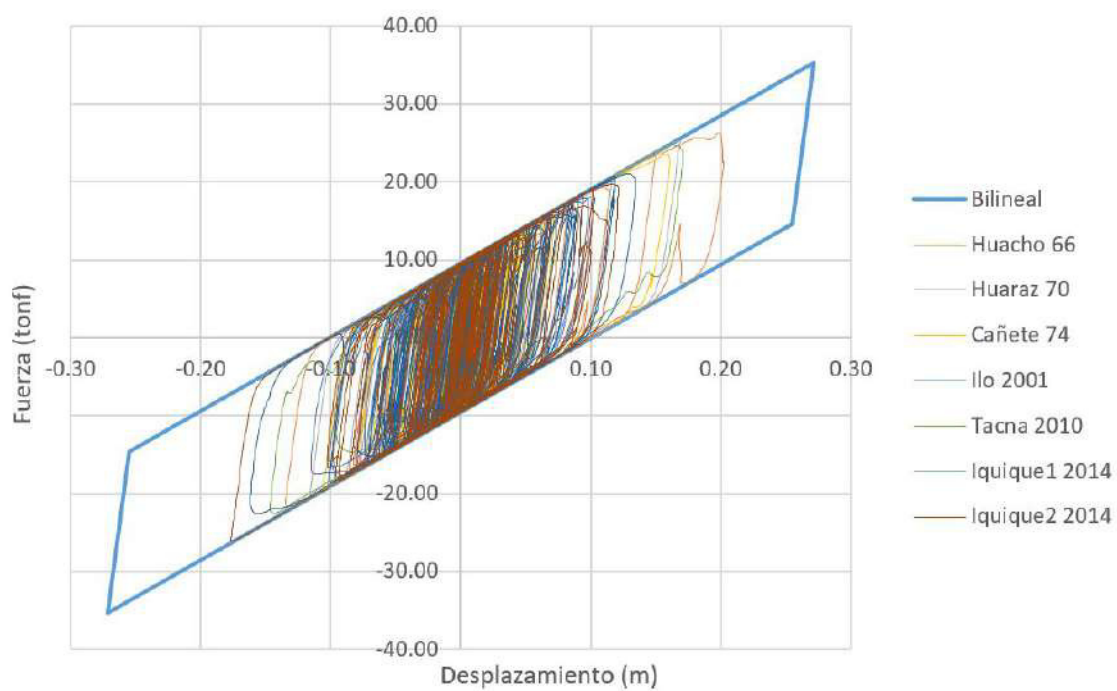


Figura D4

Lazo histerético de dispositivo LRB 01 en límite inferior en la dirección NS

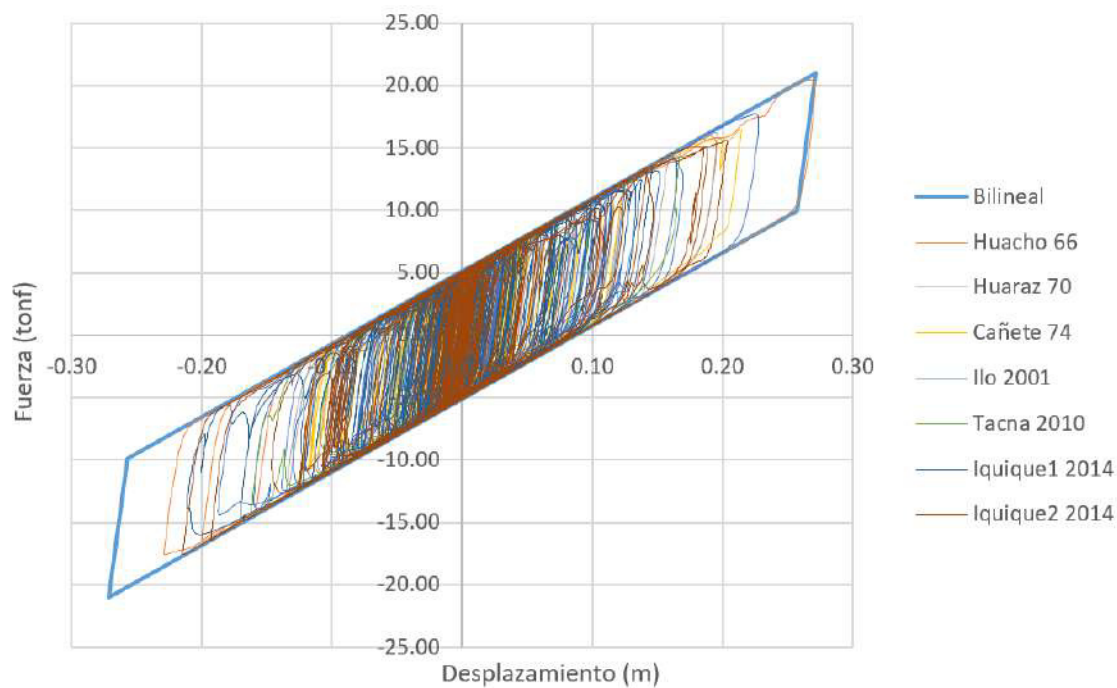


Figura D5

Lazo histerético de dispositivo SL en límite superior en la dirección EW

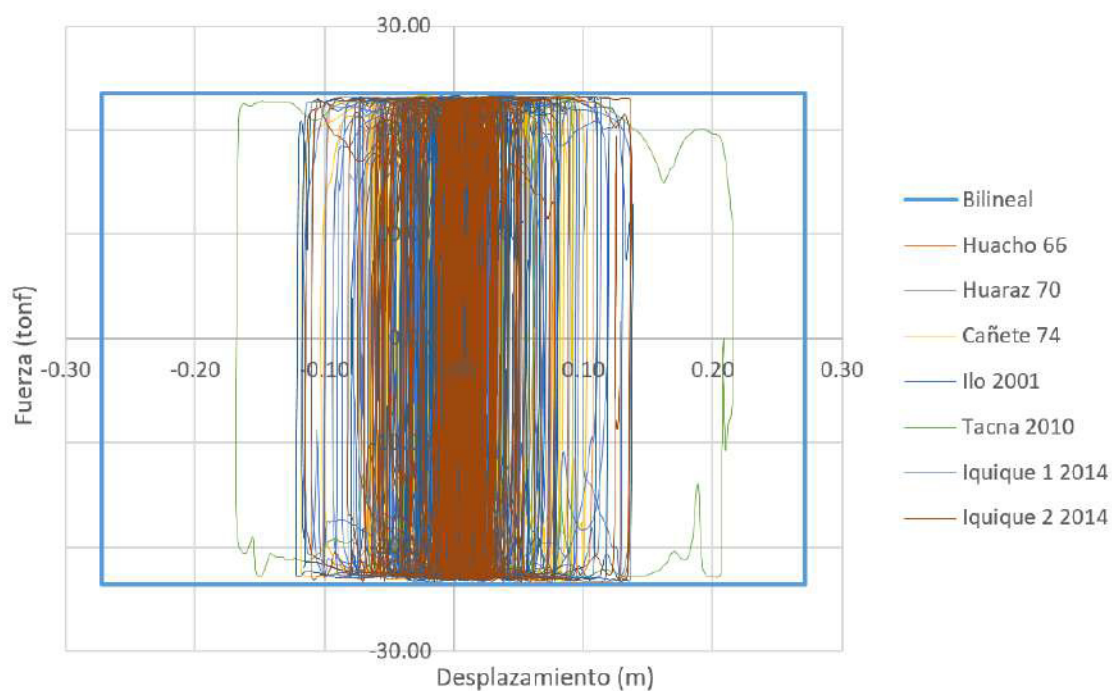


Figura D6

Lazo histerético de dispositivo SL en límite inferior en la dirección EW

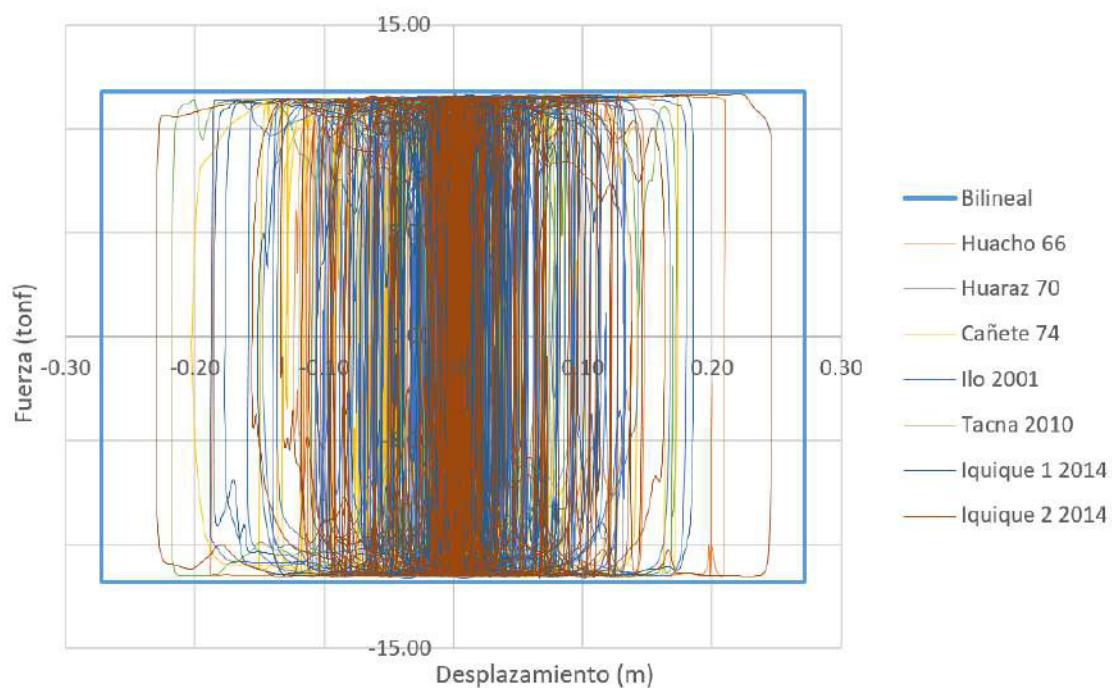


Figura D7

Lazo histerético de dispositivo SL en límite superior en la dirección NS

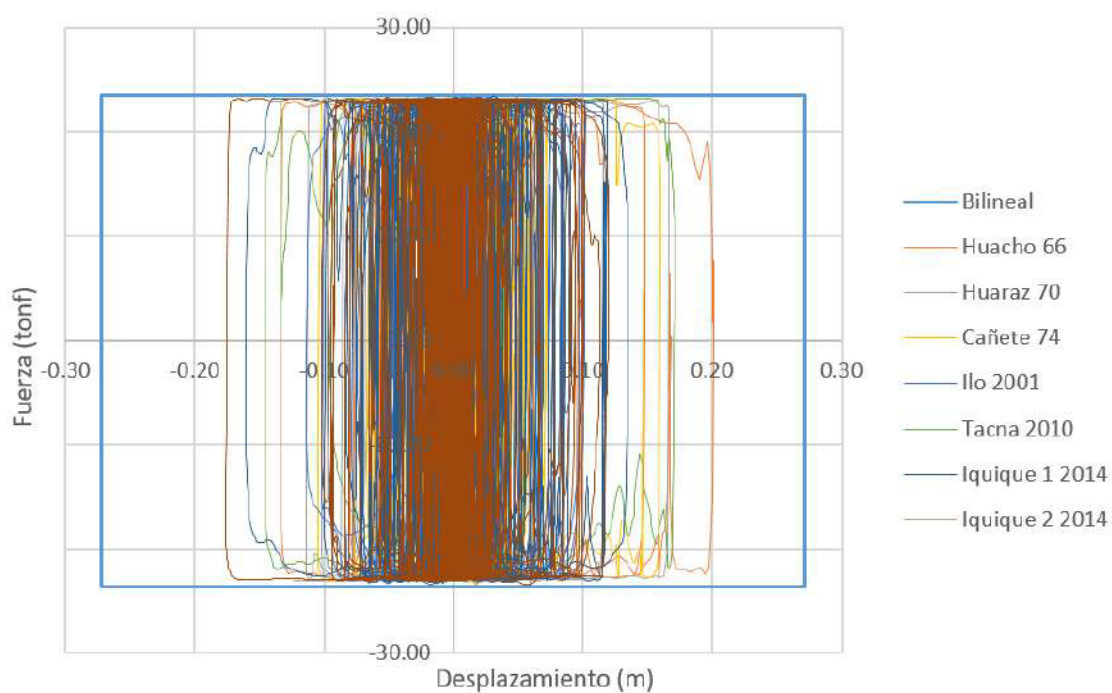
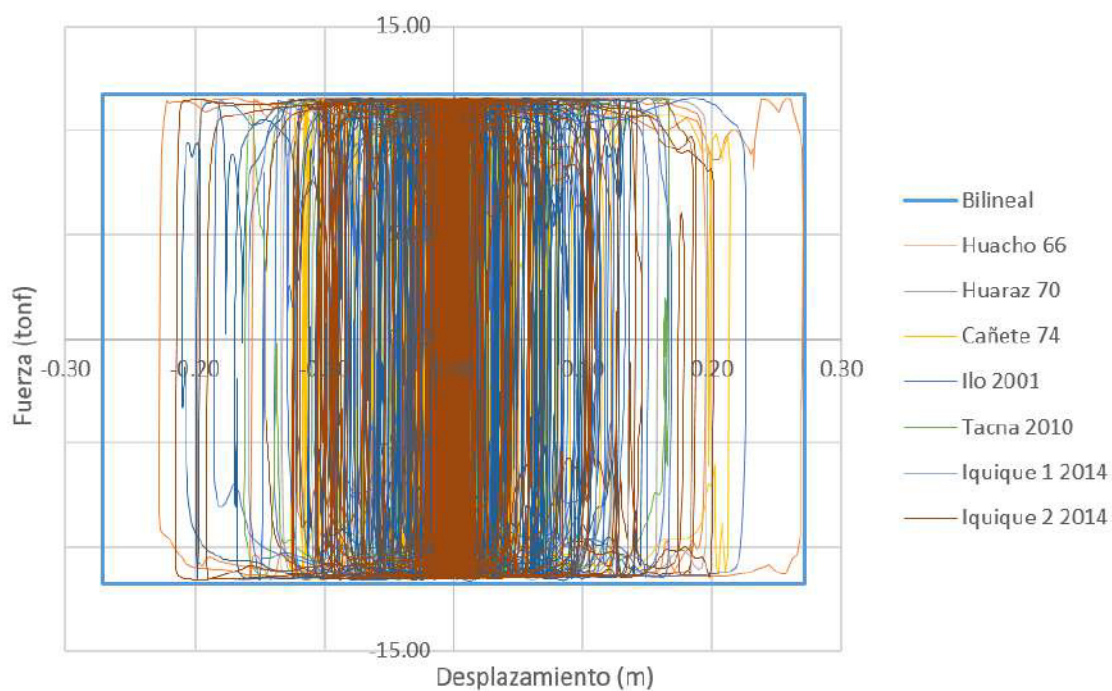


Figura D8

Lazo histerético de dispositivo SL en límite inferior en la dirección NS



Lazos histeréticos de dispositivos del sistema de aislamiento LRB+HDR+SL

Figura D9

Lazo histerético de dispositivo LRB 01 en límite superior en la dirección EW

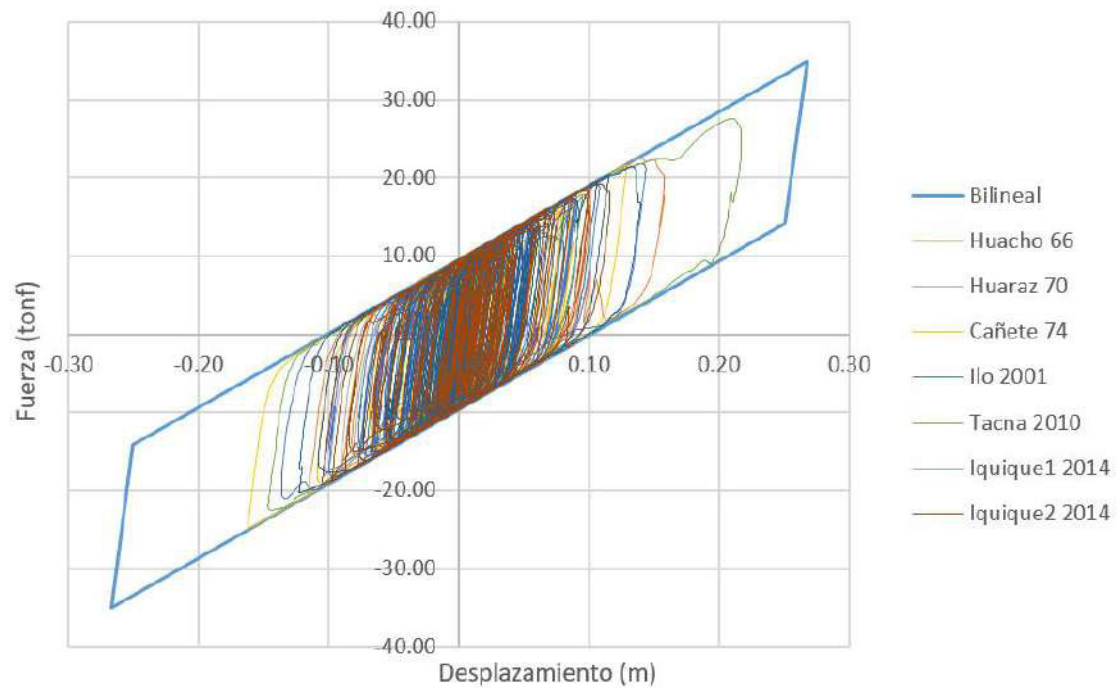


Figura D10

Lazo histerético de dispositivo LRB 01 en límite inferior en la dirección EW

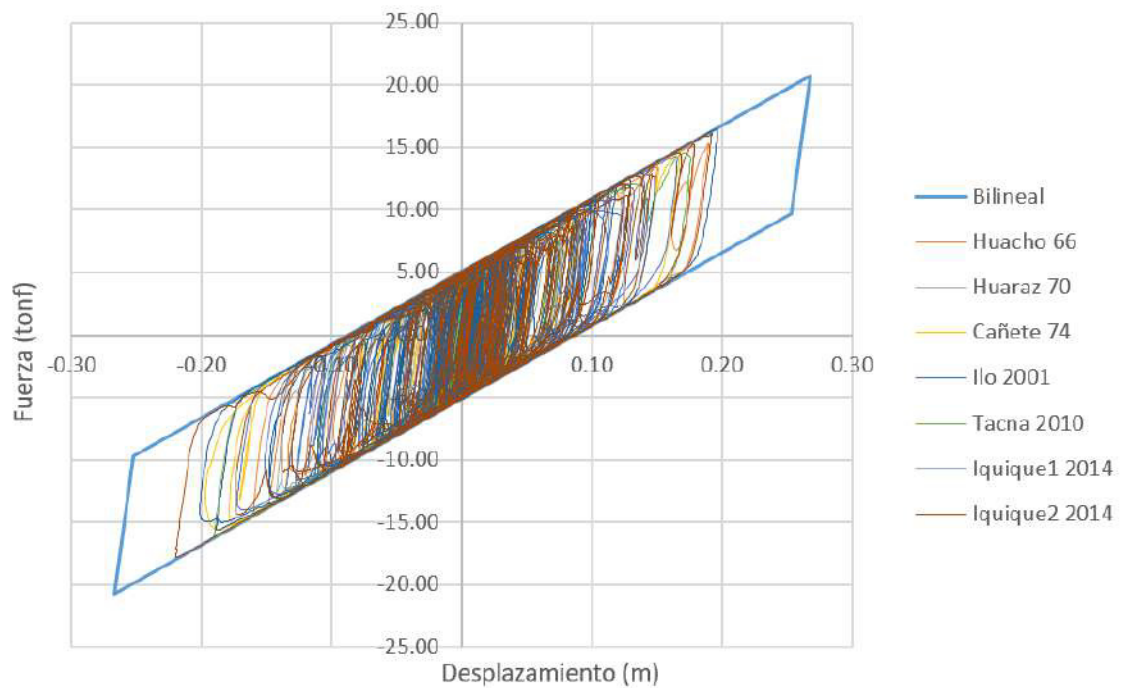


Figura D11

Lazo histerético de dispositivo LRB 01 en límite superior en la dirección NS

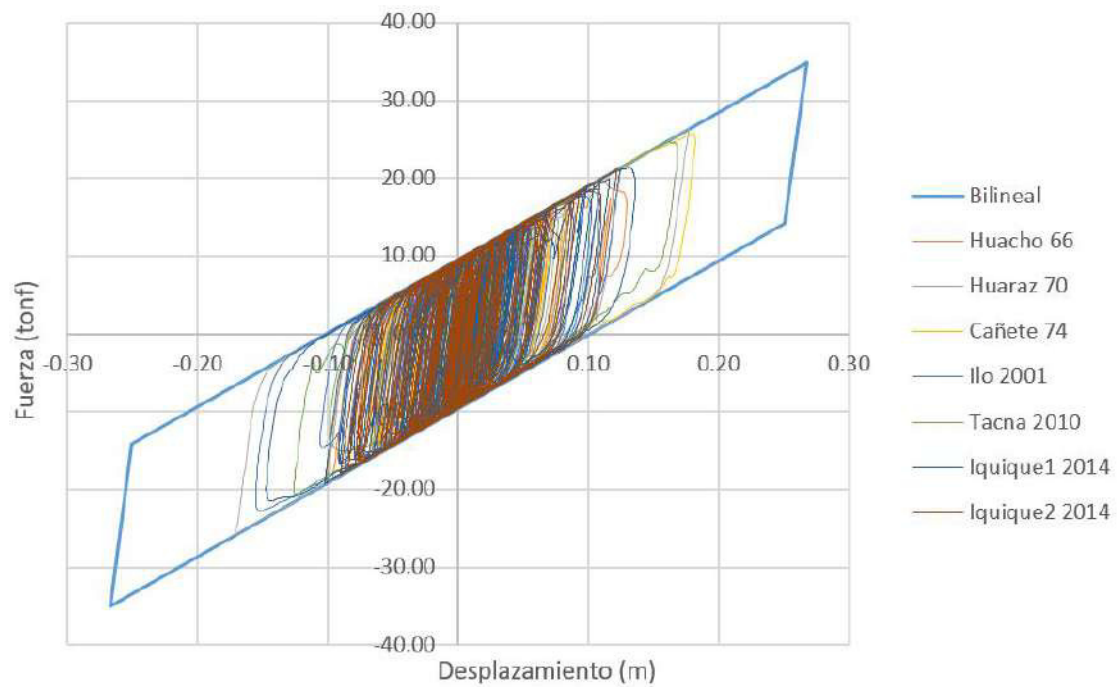


Figura D12

Lazo histerético de dispositivo LRB 01 en límite inferior en la dirección NS

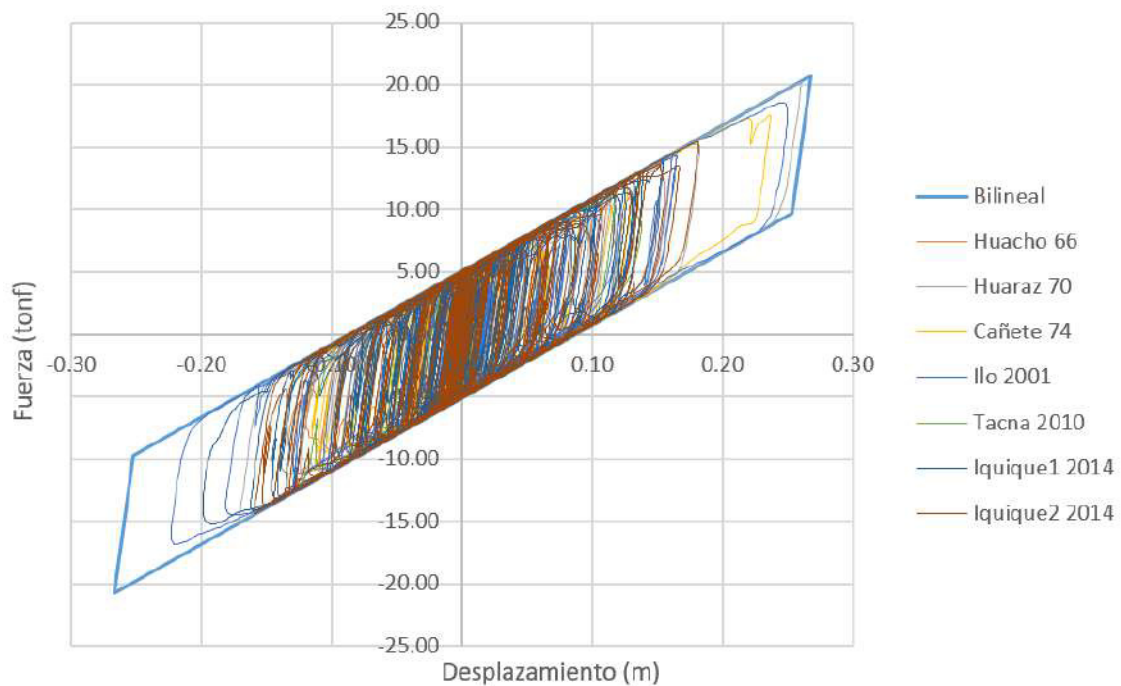


Figura D13

Lazo histerético de dispositivo HDR 01 en límite superior en la dirección EW

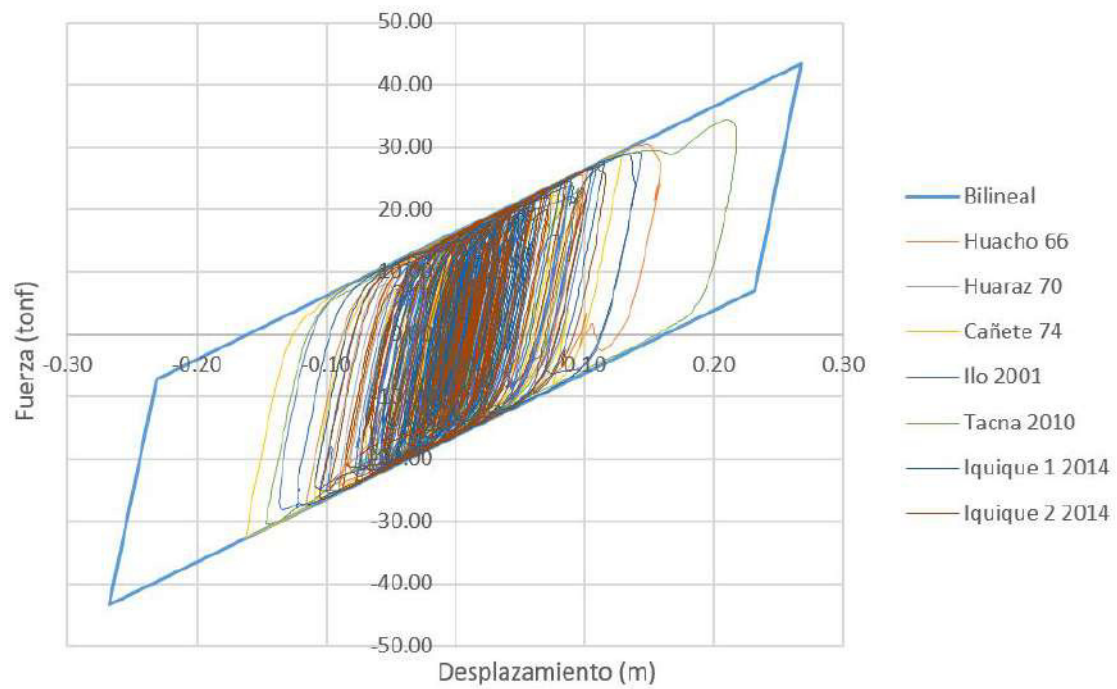


Figura D14

Lazo histerético de dispositivo HDR 01 en límite inferior en la dirección EW

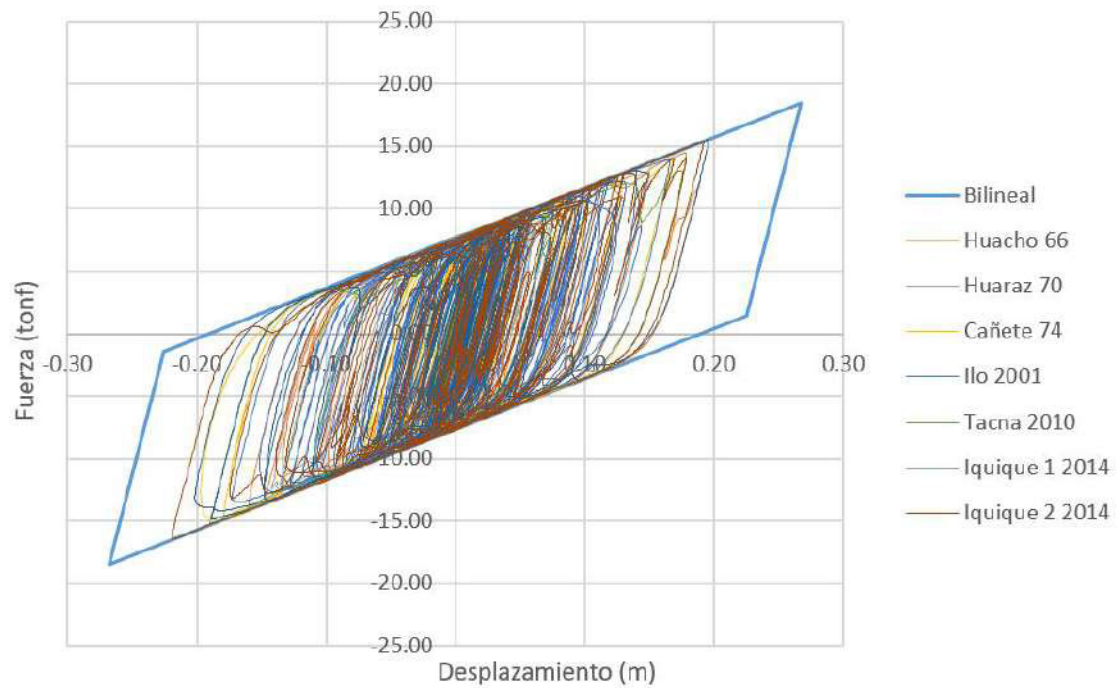


Figura D15

Lazo histerético de dispositivo HDR 01 en límite superior en la dirección NS

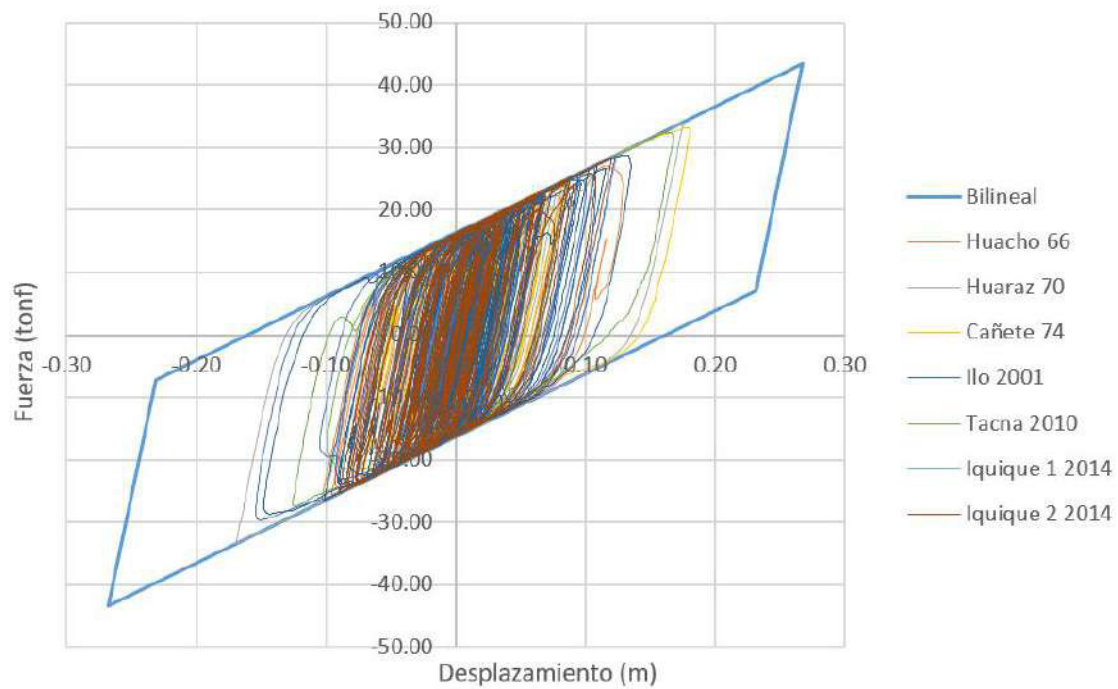


Figura D16

Lazo histerético de dispositivo HDR 01 en límite inferior en la dirección NS

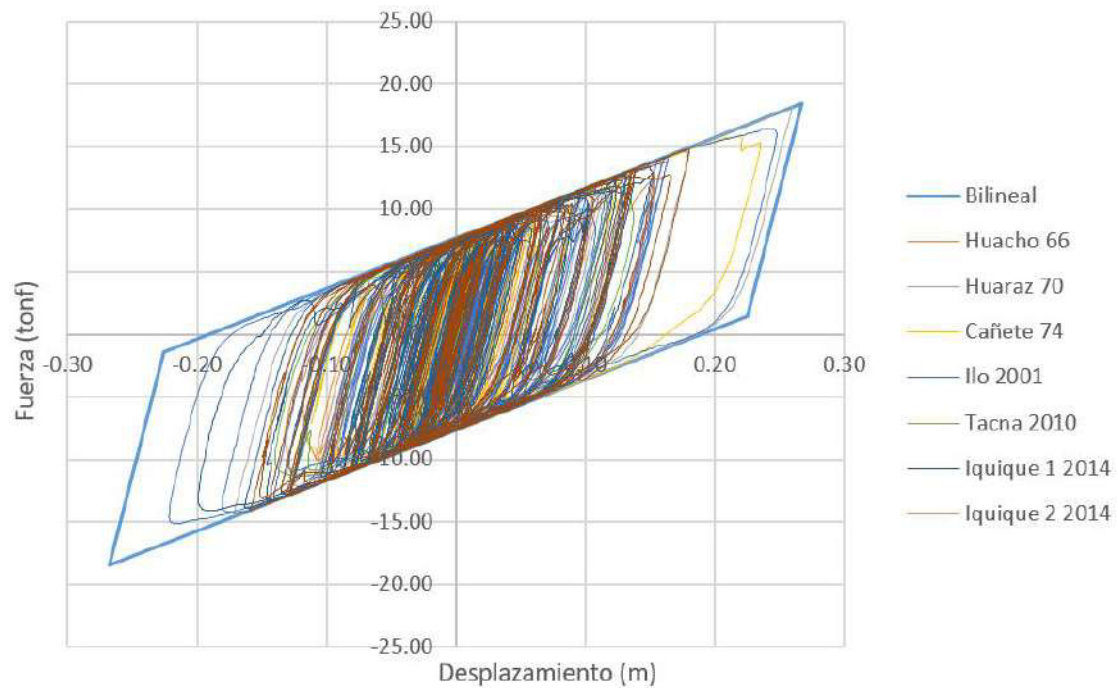


Figura D17

Lazo histerético de dispositivo SL en límite superior en la dirección EW

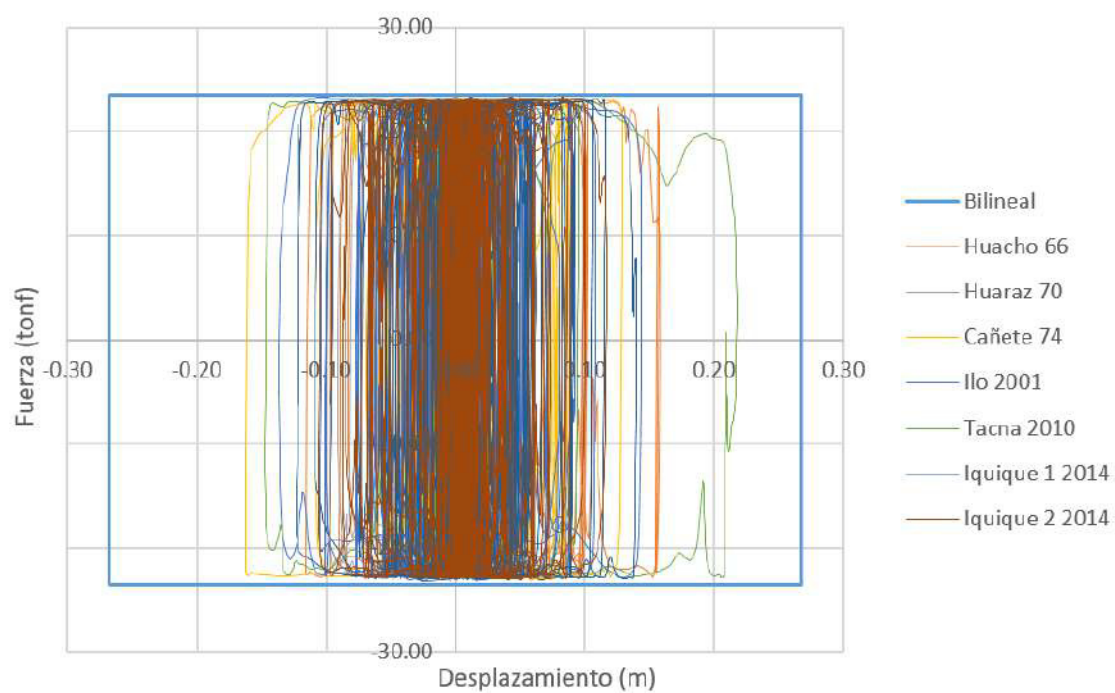


Figura D18

Lazo histerético de dispositivo SL en límite inferior en la dirección EW

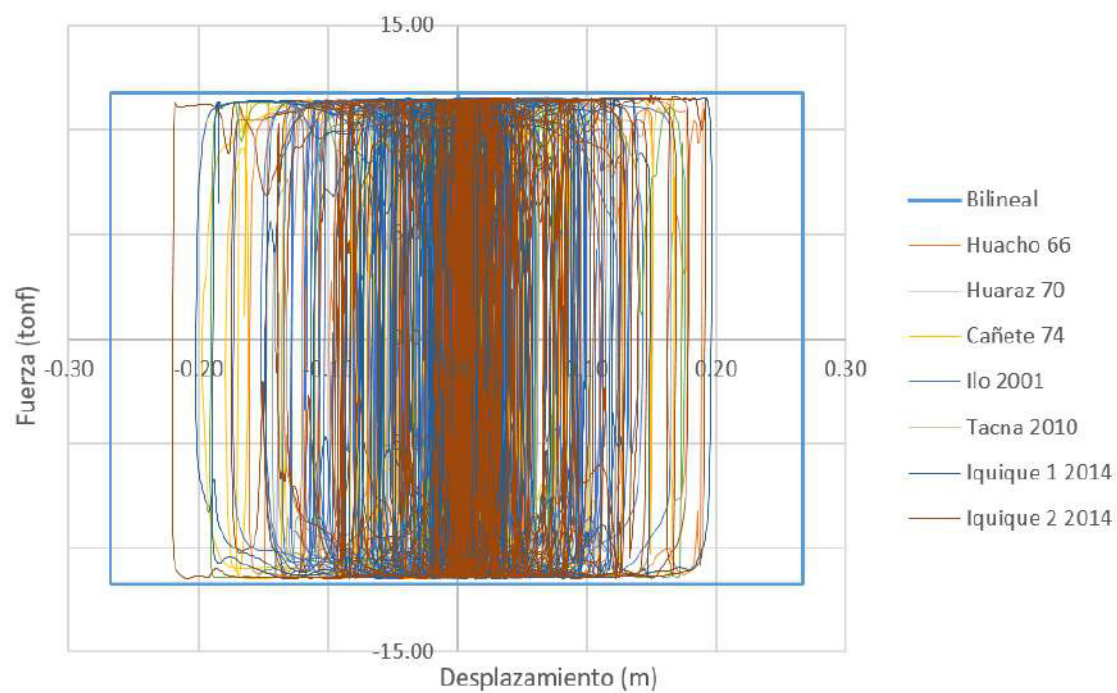


Figura D19

Lazo histerético de dispositivo SL en límite superior en la dirección NS

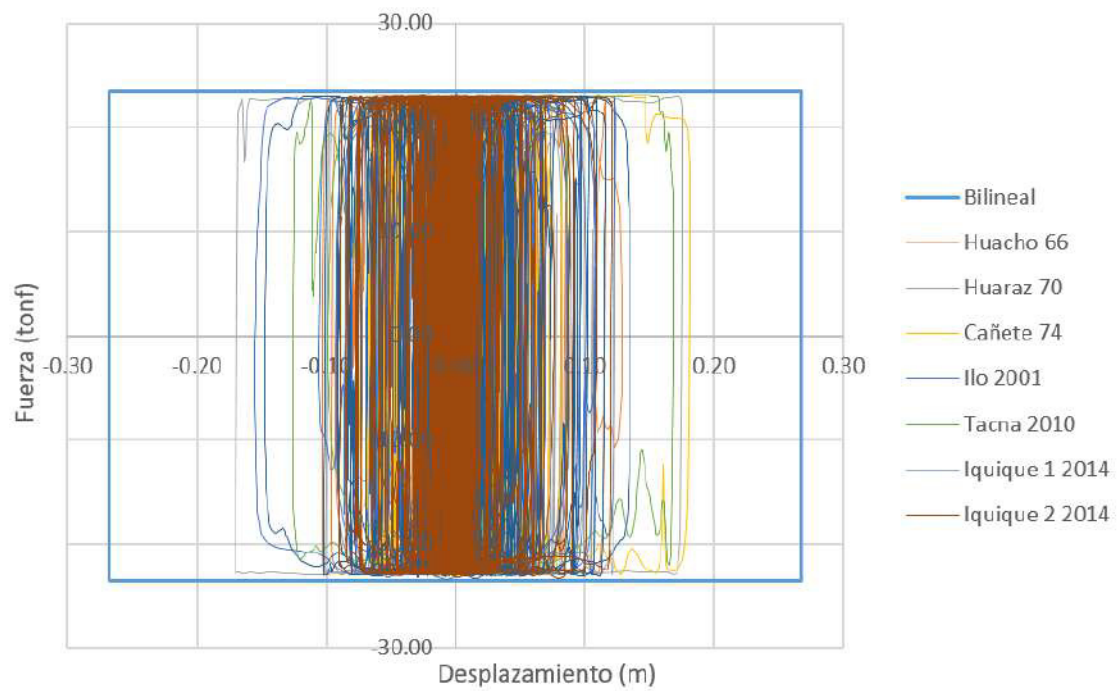
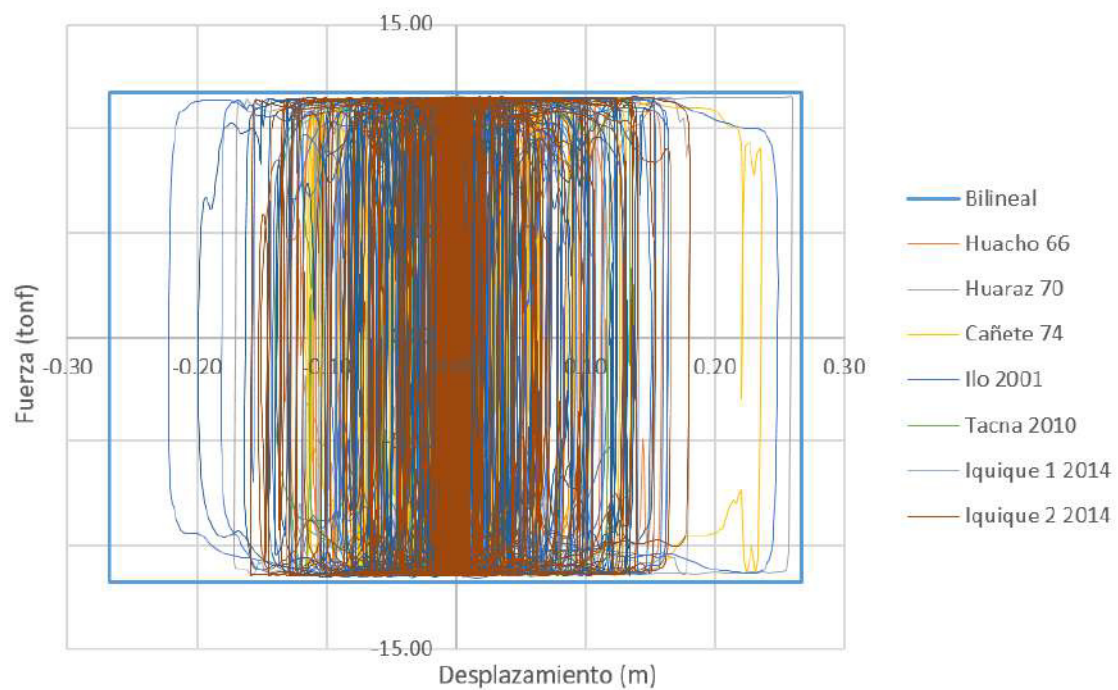


Figura D20

Lazo histerético de dispositivo SL en límite inferior en la dirección NS



Lazos histeréticos de dispositivos del sistema de aislamiento TFP

Figura D21

Lazo histerético de dispositivo TFP 01 en límite superior en la dirección EW

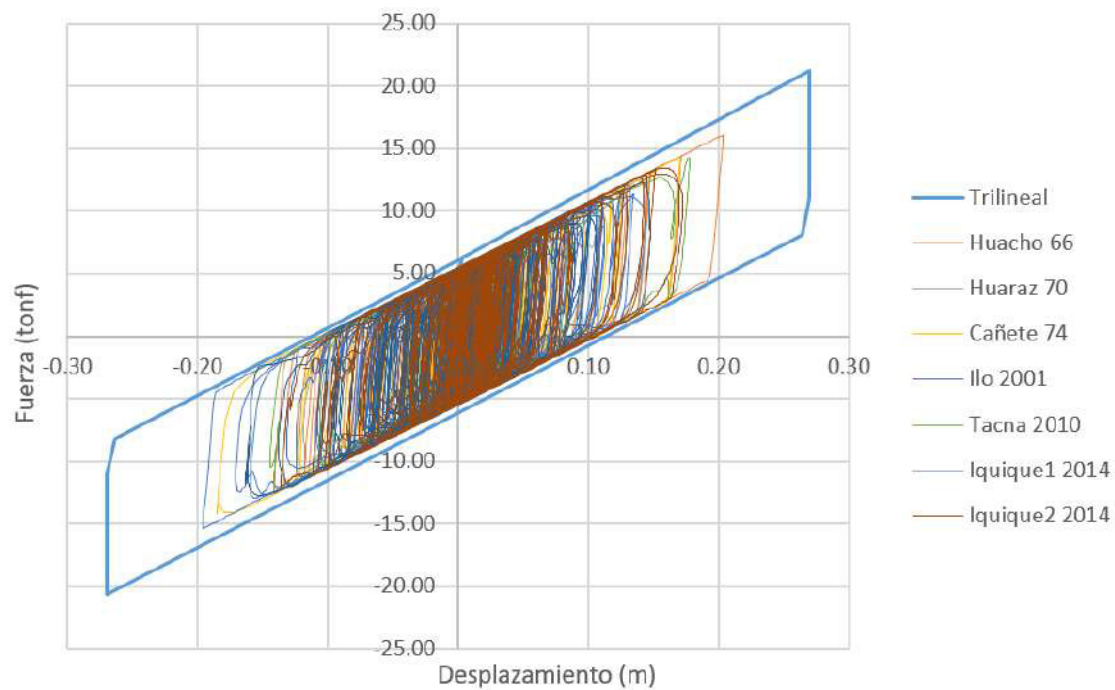


Figura D22

Lazo histerético de dispositivo TFP 01 en límite inferior en la dirección EW

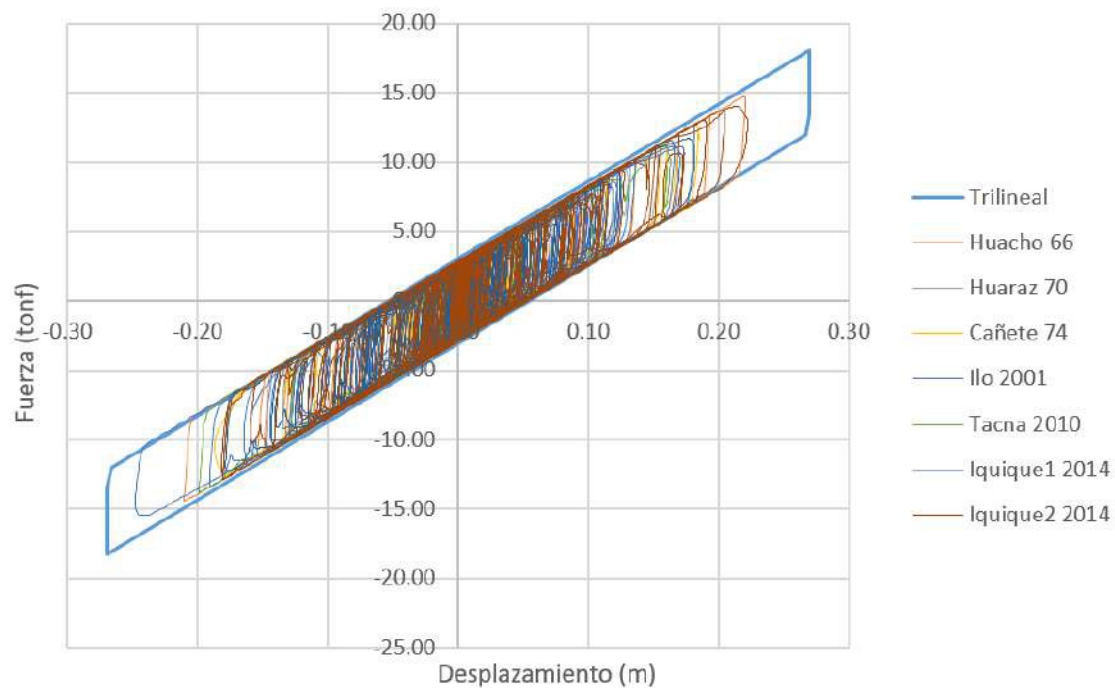


Figura D23

Lazo histerético de dispositivo TFP 01 en límite superior en la dirección NS

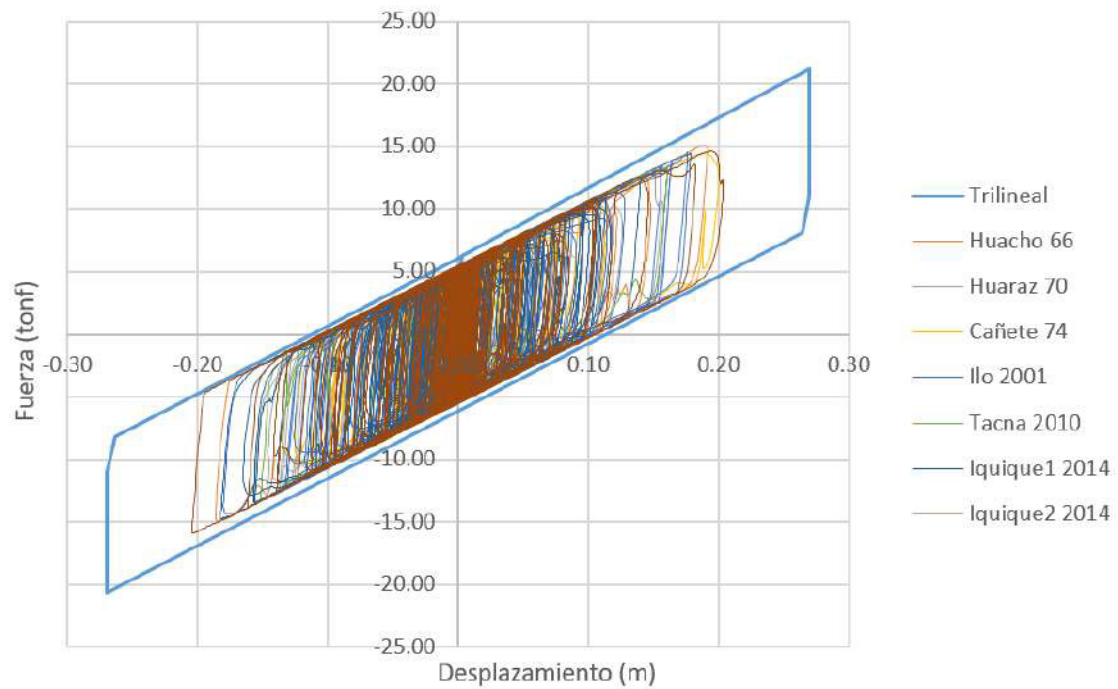


Figura D24

Lazo histerético de dispositivo TFP 01 en límite inferior en la dirección NS

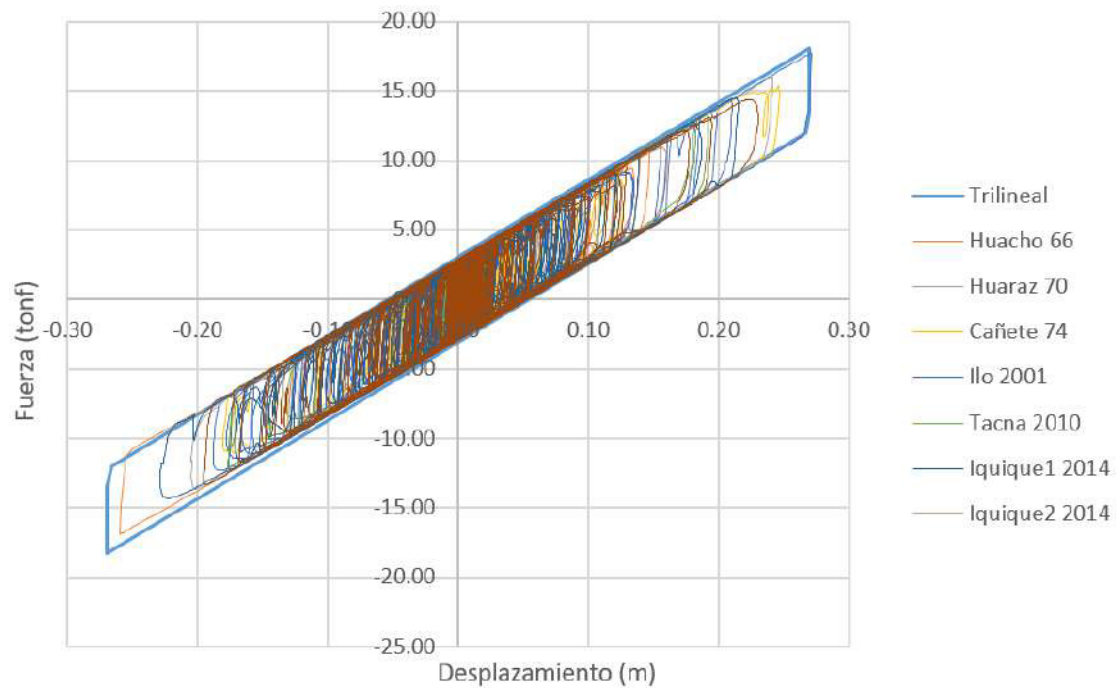


Figura D25

Lazo histerético de dispositivo TFP 02 en límite superior en la dirección EW

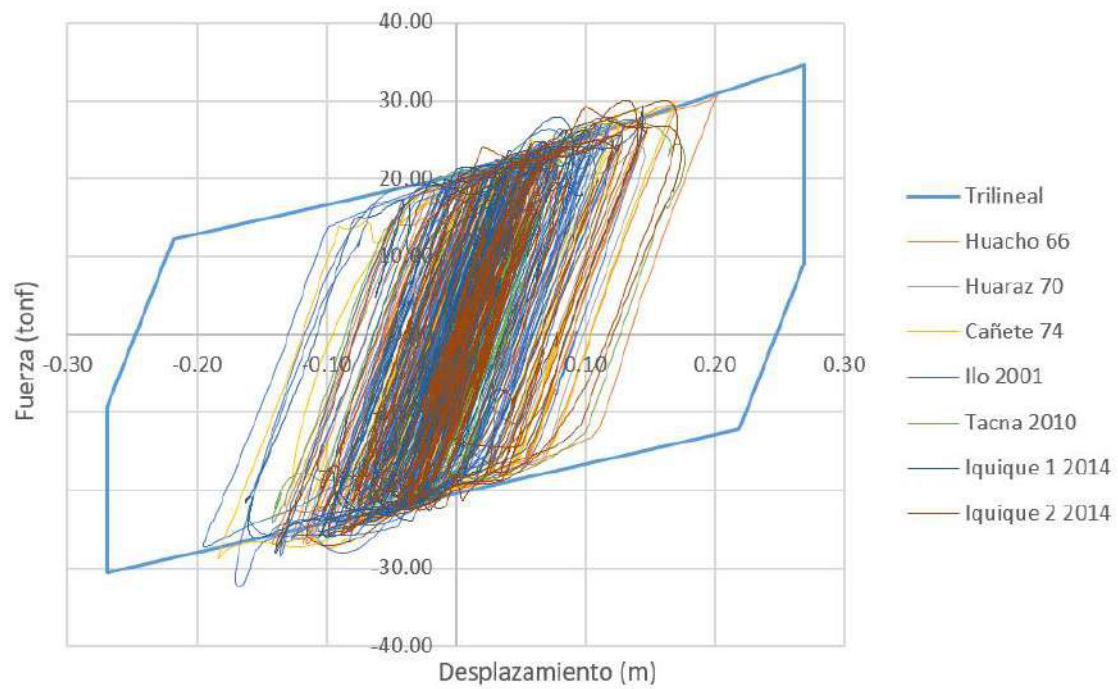


Figura D26

Lazo histerético de dispositivo TFP 02 en límite inferior en la dirección EW

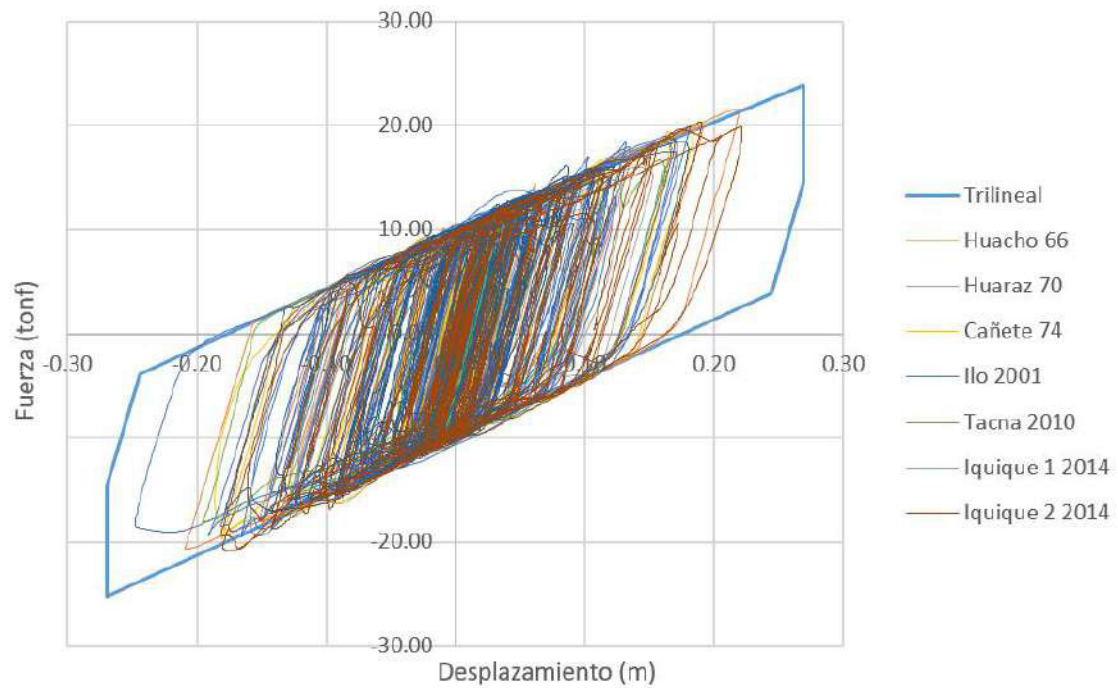


Figura D27

Lazo histerético de dispositivo TFP 02 en límite superior en la dirección NS

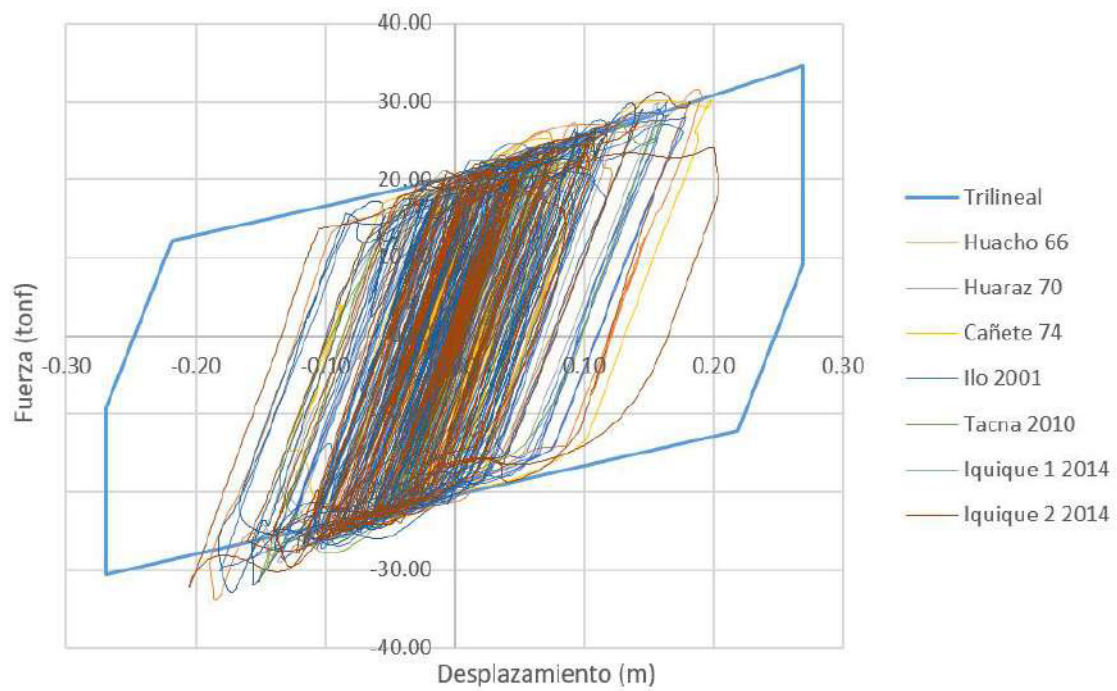
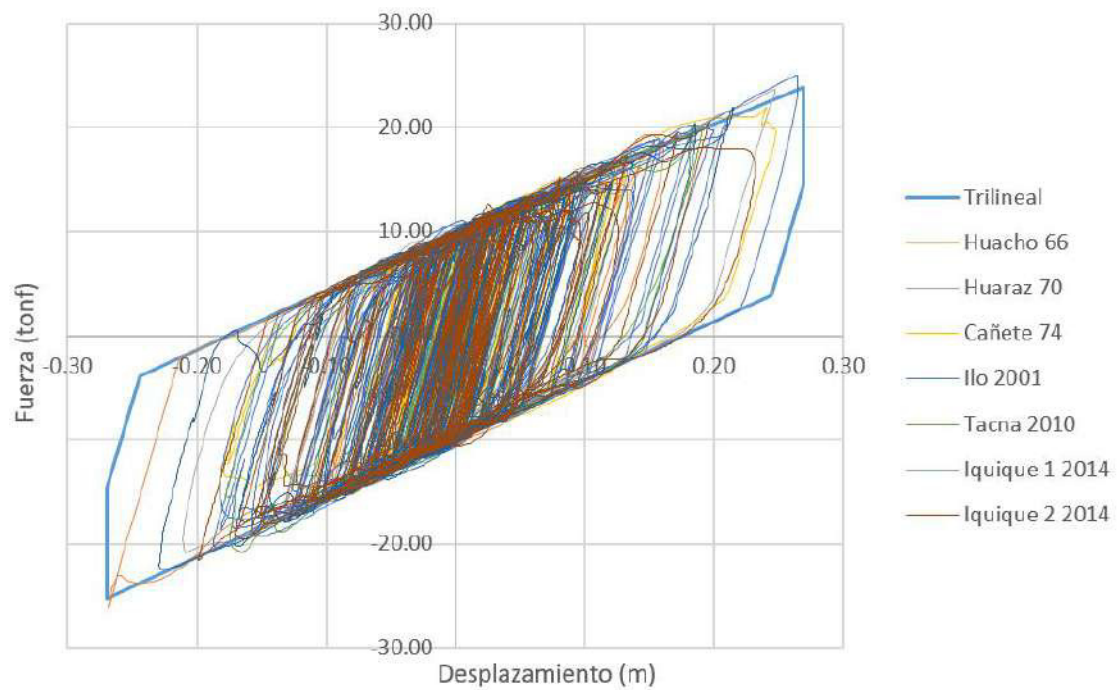


Figura D28

Lazo histerético de dispositivo TFP 02 en límite inferior en la dirección NS



ANEXO E: FICHAS TÉCNICAS

Ficha Técnica N°1

Indicador: Derivas de entrepiso
Tesis: Evaluación de la respuesta estructural de una edificación hospitalaria usando tres sistemas de aislamiento sísmico en la ciudad de Ilo-Perú
Tesisista: Cabrera Zúñiga, Elias Josue
Universidad: Universidad Nacional Federico Villarreal
Facultad: Ingeniería Civil

Nivel	Derivas máximas (‰)							
	Análisis no lineal tiempo-historia							
	LRB+SL		LRB+HDR+SL		TFP		Mejores resultados	
	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
Piso 05	--	--	--	--	--	--	--	--
Piso 04	--	--	--	--	--	--	--	--
Piso 03	--	--	--	--	--	--	--	--
Piso 02	--	--	--	--	--	--	--	--
Piso 01	--	--	--	--	--	--	--	--

Validación por juicio de expertos

	Nombres y Apellidos	CIP	Nota
1	Daniel Edinson Castillo Alva	204562	0.8
2	Ludwig Echevarría Espinoza	68897	0.9
3	Mario Ulises Rivera Díaz	166704	0.9
Promedio:			0.87

* La nota será entre 0 y 1, siendo 0.5 aprobado.


DANIEL EDINSON
CASTILLO ALVA
INGENIERO CIVIL
Reg. CIP N° 204562


LUDWIG ECHEVARRÍA ESPINOZA
INGENIERO CIVIL
Reg. CIP N° 68897


MARIO ULICES
RIVERA DÍAZ
INGENIERO CIVIL
Reg. CIP N° 166704

Ficha Técnica N°2

Indicador: Aceleraciones de piso
Tesis: Evaluación de la respuesta estructural de una edificación hospitalaria usando tres sistemas de aislamiento sísmico en la ciudad de Ilo-Perú
Tesisista: Cabrera Zúñiga, Elias Josue
Universidad: Universidad Nacional Federico Villarreal
Facultad: Ingeniería Civil

Nivel	Aceleraciones máximas (g)							
	Análisis no lineal tiempo-historia							
	LRB+SL		LRB+HDR+SL		TFP		Mejores resultados	
	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
Piso 05	--	--	--	--	--	--	--	--
Piso 04	--	--	--	--	--	--	--	--
Piso 03	--	--	--	--	--	--	--	--
Piso 02	--	--	--	--	--	--	--	--
Piso 01	--	--	--	--	--	--	--	--
Piso técnico	--	--	--	--	--	--	--	--

Validación por juicio de expertos

	Nombres y Apellidos	CIP	Nota
1	Daniel Edinson Castillo Alva	204562	0.8
2	Ludwig Echevarría Espinoza	68897	0.9
3	Mario Ulices Rivera Díaz	166704	0.9
Promedio:			0.87

* La nota será entre 0 y 1, siendo 0.5 aprobado.


DANIEL EDINSON
CASTILLO ALVA
INGENIERO CIVIL
Reg. CIP N° 204562


LUDWIG ECHEVARRÍA ESPINOZA
INGENIERO CIVIL
Reg. CIP N° 68897


MARIO ULICES
RIVERA DIAZ
INGENIERO CIVIL
Reg. CIP N° 166704

Ficha Técnica N°3

Indicador: Desplazamiento máximo del sistema de aislamiento
Tesis: Evaluación de la respuesta estructural de una edificación hospitalaria usando tres sistemas de aislamiento sísmico en la ciudad de Ilo-Perú
Tesisista: Cabrera Zúñiga, Elias Josue
Universidad: Universidad Nacional Federico Villarreal
Facultad: Ingeniería Civil

Sistema de aislamiento	Análisis no lineal tiempo-historia	
	DTM (X-X)	DTM (Y-Y)
LRB+SL	--	--
LRB+HDR+SL	--	--
TFP	--	--
Mejores resultados	--	--

Validación por juicio de expertos

	Nombres y Apellidos	CIP	Nota
1	Daniel Edinson Castillo Alva	204562	0.8
2	Ludwig Echevarría Espinoza	68897	0.9
3	Mario Ulises Rivera Díaz	166704	0.9
Promedio:			0.87

* La nota será entre 0 y 1, siendo 0.5 aprobado.


DANIEL EDINSON
CASTILLO ALVA
INGENIERO CIVIL
Reg. CIP N° 204562


LUDWIG ECHEVARRIA ESPINOZA
INGENIERO CIVIL
Reg. CIP N° 68897


MARIO ULICES
RIVERA DIAZ
INGENIERO CIVIL
Reg. CIP N° 166704

Ficha Técnica N°4

Indicador: Fuerza cortante en la base de la superestructura aislada
Tesis: Evaluación de la respuesta estructural de una edificación hospitalaria usando tres sistemas de aislamiento sísmico en la ciudad de Ilo-Perú
Tesisista: Cabrera Zúñiga, Elias Josue
Universidad: Universidad Nacional Federico Villarreal
Facultad: Ingeniería Civil

Sistema de aislamiento	Análisis no lineal tiempo-historia	
	$V_s(X-X)$	$V_s(Y-Y)$
LRB+SL	--	--
LRB+HDR+SL	--	--
TFP	--	--
Mejores resultados	--	--

Validación por juicio de expertos

	Nombres y Apellidos	CIP	Nota
1	Daniel Edinson Castillo Alva	204562	0.8
2	Ludwig Echevarría Espinoza	68897	0.9
3	Mario Ulices Rivera Díaz	166704	0.9
Promedio:			0.87

* La nota será entre 0 y 1, siendo 0.5 aprobado.



DANIEL EDINSON
CASTILLO ALVA
INGENIERO CIVIL
Reg. CIP N° 204562



LUDWIG ECHEVARRIA ESPINOZA
INGENIERO CIVIL
Reg. CIP N° 68897



MARIO ULICES
RIVERA DIAZ
INGENIERO CIVIL
Reg. CIP N° 166704

Ficha Técnica N°5

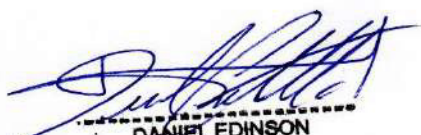
Indicador: Fuerza cortante en el sistema de aislamiento
Tesis: Evaluación de la respuesta estructural de una edificación hospitalaria usando tres sistemas de aislamiento sísmico en la ciudad de Ilo-Perú
Tesisista: Cabrera Zúñiga, Elias Josue
Universidad: Universidad Nacional Federico Villarreal
Facultad: Ingeniería Civil

Sistema de aislamiento	Análisis no lineal tiempo-historia	
	$V_b (X-X)$	$V_b (Y-Y)$
LRB+SL	--	--
LRB+HDR+SL	--	--
TFP	--	--
Mejores resultados	--	--

Validación por juicio de expertos

	Nombres y Apellidos	CIP	Nota
1	Daniel Edinson Castillo Alva	204562	0.8
2	Ludwig Echevarría Espinoza	68897	0.9
3	Mario Ulices Rivera Díaz	166704	0.9
	Promedio:		0.87

* La nota será entre 0 y 1, siendo 0.5 aprobado.


DANIEL EDINSON
CASTILLO ALVA
INGENIERO CIVIL
Reg. CIP N° 204562


LUDWIG ECHEVARRIA ESPINOZA
INGENIERO CIVIL
Reg. CIP N° 68897


MARIO ULICES
RIVERA DIAZ
INGENIERO CIVIL
Reg. CIP N° 166704

ANEXO F: LICENCIAS DE SOFTWARES

Software ETABS versión 22.5.0

Figura F1

Datos generales del software ETABS versión 22.5.0

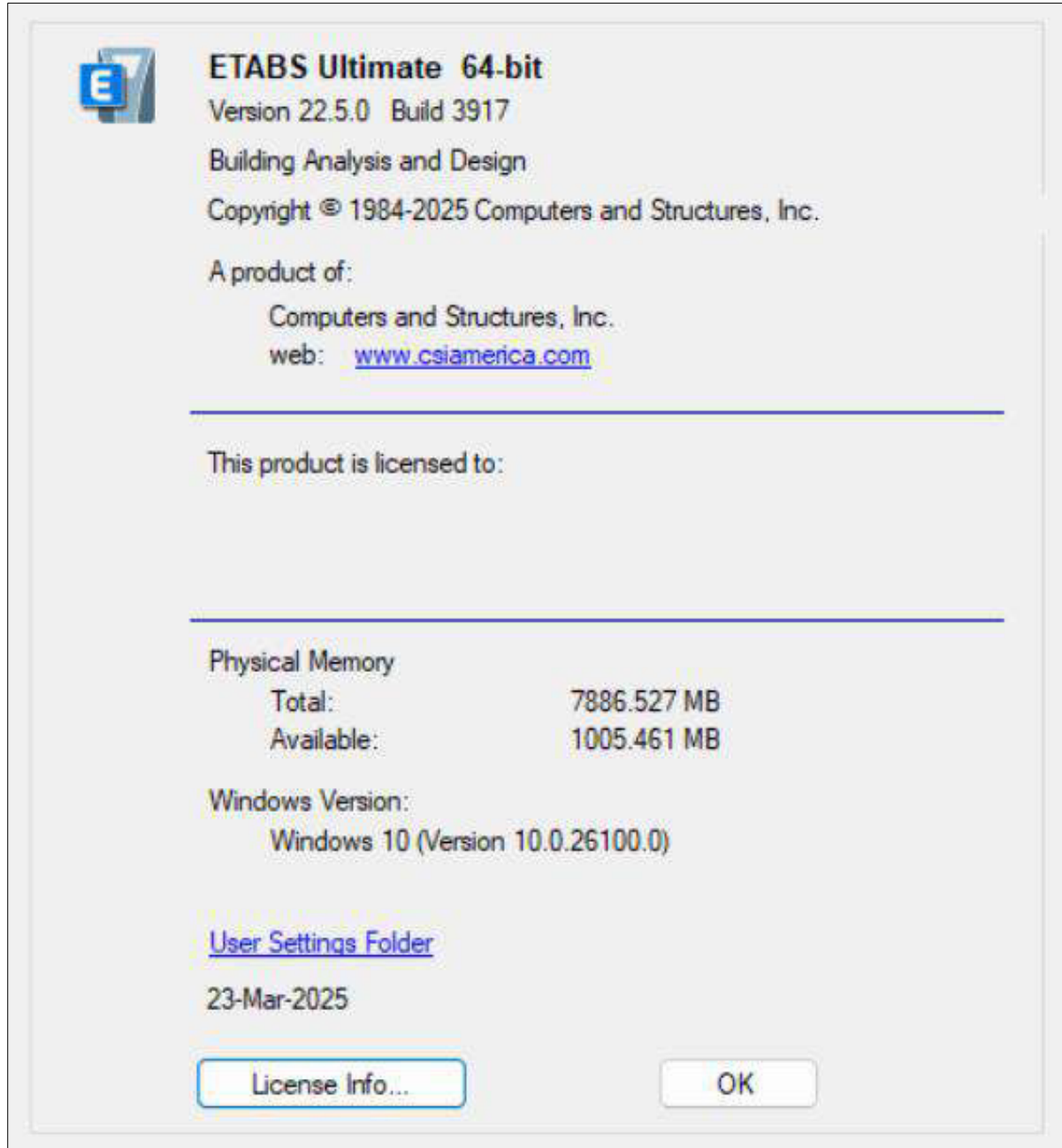


Figura F2

Información de la licencia del software ETABS versión 22.5.0

 License Information ✕

User Details

License Customer

70043: CSI Software Trial Users - Peru

User Name

Elias Josue Cabrera Zúñiga

User Email

ejcaz.ing@gmail.com

License Details

License Owner

N/A

Asset

T-41203

License Group

N/A

License Type

Trial

Instance Id

SI-4751111

License Level

Ultimate

License Edition

International

License Expires

23-Mar-2025

Days Remaining

29 days

Maintenance Details

Maintenance Status

License Checkout

Checkout Until

viernes 21- feb. -2025 18:22 

Checkout 

Software SeismoSignal v2025

Figura F3

Información de la licencia del software SeismoSignal v2025



Software SeismoMatch v2025

Figura F4

Información de la licencia del software SeismoMatch v2025



ANEXO G: DOCUMENTO DE AUTORÍA DE DISEÑO ARQUITECTÓNICO

Diseño arquitectónico para tesis académica

Mediante el presente documento, la que suscribe, Justo Victor Quillca Mayo, identificado con DNI N° 10616264, arquitecto de profesión, registrado en el Colegio de Arquitectos del Perú con el código n° 4640, indico la autoría del diseño arquitectónico del proyecto hospitalario usado en la tesis de pregrado titulada “Evaluación de la respuesta estructural de una edificación hospitalaria usando tres sistemas de aislamiento sísmico en la ciudad de Ilo-Perú” realizada por el bachiller en ingeniería civil Elias Josue Cabrera Zúñiga, para los fines académicos correspondientes a la tesis mencionada.

Lima, 24 de febrero del 2025

