



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Estudios de Postgrado
Maestría en Ciencias en Estructuras

**DISEÑO DE EDIFICIOS DE CUATRO NIVELES EMPLEANDO AISLADORES SÍSMICOS DE
BASE FRICCIONAL DE TRIPLE PÉNDULO FPT PARA LA ZONA SÍSMICA #4
DE GUATEMALA**

Ing. Kevin Antulio Morán Palencia

Asesorado por el M. Sc. Juan Carlos Alexander Tacam Menchú

Guatemala, mayo de 2022

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE EDIFICIOS DE CUATRO NIVELES EMPLEANDO AISLADORES SÍSMICOS DE
BASE FRICCIONAL DE TRIPLE PÉNDULO FPT PARA LA ZONA SÍSMICA #4
DE GUATEMALA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

ING. KEVIN ANTULIO MORÁN PALENCIA

ASESORADO POR EL M. SC. JUAN CARLOS ALEXANDER TACAM MENCHÚ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

MAESTRO EN ESTRUCTURAS

GUATEMALA, MAYO DE 2022

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Kevin Vladimir Cruz Lorente
VOCAL V	Br. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

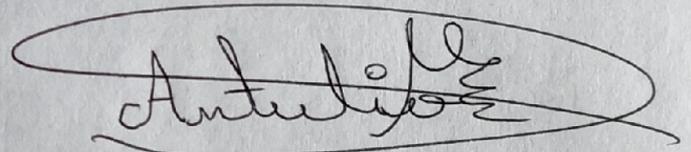
DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
DIRECTOR	Mtro. Ing. Edgar Darío Álvarez Cotí
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Armando Fuentes Roca
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Francisco Eduardo Arrecis Sosa
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**DISEÑO DE EDIFICIOS DE CUATRO NIVELES EMPLEANDO AISLADORES SÍSMICOS DE
BASE FRICCIONAL DE TRIPLE PÉNDULO FPT PARA LA ZONA SÍSMICA #4
DE GUATEMALA**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Postgrado, con fecha 16 de noviembre de 2021.

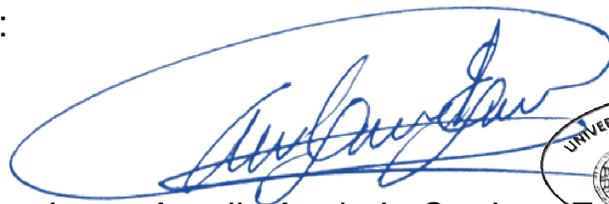
A handwritten signature in black ink, enclosed within a hand-drawn oval. The signature is cursive and appears to read 'Antulio Morán Palencia'.

Ing. Kevin Antulio Morán Palencia

LNG.DECANATO.OI.383.2022

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Estudios de Posgrado, al Trabajo de Graduación titulado: **DISEÑO DE EDIFICIOS DE CUATRO NIVELES EMPLEANDO AISLADORES SÍSMICOS DE BASE FRICCIONAL DE TRIPLE PÉNDULO FPT PARA LA ZONA SÍSMICA #4 DE GUATEMALA**, presentado por: **Kevin Antulio Morán Palencia**, que pertenece al programa de Maestría en ciencias en Estructuras después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada ★

Decana

Guatemala, mayo de 2022

AACE/gaoc



Guatemala, mayo de 2022

LNG.EEP.OI.383.2022

En mi calidad de Director de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del asesor, verificar la aprobación del Coordinador de Maestría y la aprobación del Área de Lingüística al trabajo de graduación titulado:

“DISEÑO DE EDIFICIOS DE CUATRO NIVELES EMPLEANDO AISLADORES SÍSMICOS DE BASE FRICCIONAL DE TRIPLE PÉNDULO FPT PARA LA ZONA SÍSMICA #4 DE GUATEMALA”

presentado por **Kevin Antulio Morán Palencia** correspondiente al programa de **Maestría en ciencias en Estructuras**; apruebo y autorizo el mismo.

Atentamente,

“Id y Enseñad a Todos”

Mtro. Ing. Edgar Darío Álvarez Colí
Director

Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería





Guatemala, 19 de octubre de 2021

MSc. Ing Edgar Álvarez Cotí
Director, Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala
Presente

Por este medio informo a usted, que se ha revisado y APROBADO la siguiente TESIS DE GRADUACIÓN titulado: "DISEÑO DE EDIFICIOS DE CUATRO NIVELES EMPLEANDO AISLADORES SÍSMICOS DE BASE FRICCIONAL DE TRIPLE PÉNDULO FPT PARA LA ZONA SÍSMICA #4 DE GUATEMALA" del estudiante Kevin Antulio Morán Palencia, quien se identifica con numero de carné 999003060, del programa de Maestría en Estructuras.

Con base en la evaluación realizada, se hace constar que se ha evaluado la calidad, validez, pertinencia y coherencia de los resultados obtenidos en el trabajo presentado y según lo establecido en el Normativo de Tesis y Trabajos de Graduación aprobado por Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería Punto Sexto inciso 6.10 del Acta 04-2014 de sesión celebrada el 04 de febrero de 2014.

Por lo anterior, se entrega con la presente, la hoja de evaluación aprobada por el docente del curso y toda la documentación administrativa de respaldo, para su aprobación correspondiente por parte de la Escuela de Estudios de Postgrado.

Sin otro particular

Vo. Bo.
Msc. Ing. Armando Fuentes Roca
Coordinador Área Estructuras
Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería

Guatemala, octubre del 2021

MSc. Ing. Edgar Álvarez Cotí
Director, Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala
Presente

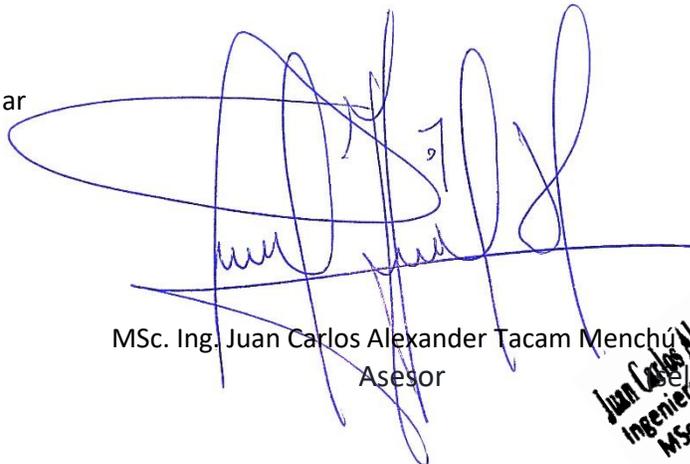
Por este medio informo a usted, que, como ASESOR, he revisado y aprobado la siguiente **TÉSIS DE GRADUACIÓN** del alumno:

Carné: 999003060
Alumno: Kevin Antulio Morán Palencia
Maestría: Estructuras
Título de la Investigación: DISEÑO DE EDIFICIOS DE CUATRO NIVELES EMPLEANDO AISLADORES SÍSMICOS DE BASE FRICCIONAL DE TRIPLE PÉNDULO FPT PARA LA ZONA SÍSMICA #4 DE GUATEMALA.

En este sentido, extendiendo el Visto Bueno correspondiente, para el cumplimiento de requisitos de la Escuela de Estudios de Postgrado, de la Facultad de Ingeniería, de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Asimismo, se hace constar que el estudiante cumplió con el pago de los honorarios profesionales de asesoría de dicha tesis de graduación.

Sin otro particular



MSc. Ing. Juan Carlos Alexander Tacam Menchu
Asesor

Juan Carlos Alexander Tacam Menchu
Ingeniero Civil - Cotegiado 8779
MSc. Ingeniería Geotécnica

ACTO QUE DEDICO A:

Dios

Dándole infinitas gracias por tantas cosas buenas que me ha brindado, especialmente por permitirme finalizar mi proceso de tesis.

Mi familia

Marbin Antulio Morán Tobar y Rosa María Palencia Ramírez, gracias a ellos son quien soy, son mi mayor inspiración.

Mis primos

Especialmente a Helder Antulio Morán Mendizábal (q. d. e. p.), que Dios lo tiene en su gloria. Gracias por estar en los momentos más importantes de mi vida, por todos los consejos, enseñanzas y valores que mantendré conmigo el resto de mi vida.

AGRADECIMIENTOS A:

**Universidad de San
Carlos de Guatemala**

Por ser la institución de mi formación académica en el grado de maestría.

**Escuela de Postgrado
de la Facultad de
Ingeniería**

Que me dieron una enseñanza integral y por otorgarme la especialización profesional.

Mis catedráticos

Que me guiaron en el proceso para obtener mi título universitario.

Mis compañeros

Quienes han estado en buenos y malos momentos conmigo, gracias por su apoyo incondicional.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	XV
GLOSARIO	XVII
RESUMEN	XIX
ANTECEDENTES	XXI
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	XXVII
OBJETIVOS	XXXI
HIPÓTESIS	XXXIII
RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO	XXXV
INTRODUCCIÓN	XXXVII
1. RESEÑA DE LA INGENIERÍA ESTRUCTURAL SOBRE LOS AISLADORES SÍSMICOS	1
1.1. Ingeniería sísmica	2
1.2. Aisladores sísmicos	3
1.3. Aisladores de base	4
1.3.1. Sistema de péndulo de fricción	6
1.3.2. Simple péndulo de fricción (SFP)	12
1.3.3. Doble péndulo de fricción (DFP)	16
1.3.3.1. Ciclo I del aislador	18
1.3.3.2. Ciclo II del aislador	20
1.3.4. Triple péndulo de fricción (FPT)	21
1.3.4.1. Ciclo I del aislador	27
1.3.4.2. Ciclo II del aislador	29
1.3.4.3. Ciclo III del aislador	32

1.3.4.4.	Ciclo IV del aislador.....	35
1.3.4.5.	Ciclo V del aislador.....	38
2.	FILOSOFÍA DE DISEÑO DE AISLADORES FPT	43
2.1.	Control estructural.....	43
2.2.	Características de una estructura con un aislador de base aislada.....	44
2.3.	Modelo histerético bi-lineal de aisladores.....	48
2.4.	Terminología del sistema de aislación	49
2.5.	Configuración de las unidades de aislación	52
2.6.	Características geométricas.....	53
2.6.1.	Altura (h_i).....	53
2.6.2.	Radio de curvatura (R_i)	54
2.6.3.	Coefficientes de Fricción μ_i	56
2.7.	Propiedades superiores e inferiores de los aisladores FPT	58
2.7.1.	Capacidad de reintegración.....	58
2.7.2.	Capacidad de movimiento	61
2.8.	Contacto con el fabricante del aislador FPT.....	63
2.9.	Ubicación de aisladores	64
2.9.1.	Colocación de aisladores en la planta	64
2.9.2.	Dimensión en planta.....	65
2.9.3.	Nomenclatura que identifica el aislador FPT	66
3.	ANÁLISIS SÍSMICO.....	69
3.1.	Análisis de construcciones sin aisladores sísmicos	69
3.2.	Ductilidad	69
3.2.1.	Espectro de respuesta	70
3.3.	Fallas geológicas	71
3.4.	Aspectos teóricos del diseño estructural	72

3.5.	Índice de sismicidad (I_0)	73
3.6.	Período de la estructura	73
3.7.	Factor de respuesta sísmica (R).....	73
3.8.	Factor de sobre resistencia (ΩR).....	74
3.9.	Factor de incremento del desplazamiento elástico (C_d)	74
3.10.	Peso sísmico efectivo (W_s)	74
3.11.	Cortante basal al límite de cedencia.....	75
3.12.	Coeficiente sísmico al límite de cedencia (C_s)	75
3.13.	Período fundamental de vibración (T_a)	76
3.14.	Métodos de estudio	77
3.14.1.	Análisis Modal Espectral	78
3.14.2.	Calibración del análisis modal	79
3.15.	Derivas últimas máximas tolerables	80
3.16.	Método de fuerza lateral equivalente.....	81
3.17.	Método de estudio historia de tiempo no lineal.....	82
3.18.	Programa ETABS	84
3.18.1.	Análisis historia de tiempo en ETABS	85
3.18.2.	Función de análisis historia de tiempo.....	85
4.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	87
4.1.	Caso 1 Hospital	87
4.1.1.	Combinaciones de carga	94
4.1.2.	Análisis historia de tiempo selección de acelerogramas.....	95
4.1.3.	Parámetros de selección de acelerogramas.....	96
4.1.4.	Escalado de los registros sísmicos.....	98
4.1.5.	Ubicación de aisladores	102
4.1.6.	Análisis de modos.....	104
4.1.7.	Análisis por el método de fuerza equivalente	104

4.1.8.	Diseño del aislador péndulo interior para sismos frecuentes en servicio	112
4.1.9.	Diseño del aislador péndulo interior para sismos de diseño.....	114
4.1.10.	Diseño del aislador péndulo superior para sismo máximo creíble	116
4.2.	Caso 2.....	121
4.2.1.	Diseño del aislador péndulo interior	132
4.2.2.	Diseño del aislador péndulo interior para sismos de diseño.....	133
4.2.3.	Diseño del aislador péndulo superior para sismo máximo creíble	135
5.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	139
5.1.	Edificio sin aisladores.....	152
5.2.	Edificio con aisladores.....	171
5.3.	Discusión de los resultados.....	192
	CONCLUSIONES.....	195
	RECOMENDACIONES	197
	REFERENCIAS	199

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Edificio sin aislador y con aislador de base.....	5
2.	Detalle de unión de una columna de acero en la parte superior del aislador FPS y hormigón en la parte inferior	8
3.	Aislador de Péndulo de fricción.....	9
4.	Inicio del funcionamiento de aisladores péndulo de fricción.....	10
5.	Movimiento característico del sistema de péndulo de fricción.....	11
6.	Función de la junta en el sistema de péndulo de fricción	11
7.	Parte de un aislador simple péndulo de fricción	12
8.	El modelo de rodamiento SFP. (a) Las fuerzas y el desplazamiento, (b) Modelo numérico	14
9.	Aislador simple péndulo de fricción en posición deformada y diagrama de cuerpo libre.....	14
10.	Curvatura de histéresis del aislador simple péndulo fricción.....	16
11.	Partes principales del aislador doble péndulo de fricción.....	17
12.	Ciclo I del aislador doble péndulo de fricción	19
13.	Fase II del aislador doble péndulo de fricción	20
14.	Curvatura de la histéresis del aislador doble péndulo de fricción.....	21
15.	Partes principales del aislador FPT.....	23
16.	Resumen de las superficies que se activan en cada fase de movimiento.....	25
17.	Relación fuerza-desplazamiento monotónica del aislador FPT.....	26
18.	Ciclo I del aislador triple péndulo de fricción	27

19.	Curvatura de la histéresis de la fase I del aislador triple péndulo de fricción	28
20.	Ciclo II del aislador Triple Péndulo de Fricción en posición deformada y diagrama de cuerpo libre	30
21.	Curva de histéresis de la fase II del aislador FPT	31
22.	Ciclo del movimiento III del aislador.....	33
23.	Curva de histéresis de la fase III del aislador FPT	34
24.	Ciclo IV del aislador Triple Péndulo de Fricción.....	35
25.	Curva de histéresis de la fase IV del aislador FPT	37
26.	Fase del movimiento V del aislador	39
27.	Curva de histéresis de la fase IV del aislador FPT	40
28.	Edificio aislado, modelo histerético, modelo lineal.....	47
29.	Terminología del sistema de aislación y desplazamientos conforme con la norma (ASCE 7-16).....	50
30.	Detalles de colocación del aislador.....	53
31.	Implicación del periodo y coeficiente de fricción en el comportamiento de aisladores FPS.....	61
32.	Nomenclatura de un aislador FPT	65
33.	Ejemplo de la nomenclatura de EPS – FPT 15663/22-20/16-8	68
34.	Espectro de aceleraciones.....	71
35.	Fallas de Guatemala.....	72
36.	Vista en planta del edificio hospital	88
37.	Vista en 3D del edificio hospital	89
38.	Vista en elevación del edificio hospital.....	89
39.	Espectro de respuesta San Pedro Pinula, Jalapa.....	92
40.	Vista de sismo mayores de 6 Mw de fecha 15/04/2016.....	97
41.	Importación de registro San Cristóbal a escalar usando <i>Seismomatch</i>	98
42.	Importación de registro Cesem a escalar usando <i>Seismomatch</i>	99

43.	Espectro objetivo y parámetro a escalar utilizando <i>Seismomatch</i>	100
44.	Resultado del componente escalado San Cristóbal utilizando <i>Seismomatch</i>	101
45.	Resultado del componente escalado Cesem utilizando <i>Seismomatch</i>	101
46.	Ubicación de los aisladores FPT en el proyecto del hospital	103
47.	Péndulo interior para sismos frecuentes	113
48.	Péndulo interior para sismos frecuentes	115
49.	Péndulo superior para máximo sismo creíble	117
50.	Vista en 3D del edificio educativo	122
51.	Vista en elevación del edificio educativo	123
52.	Espectro de respuesta Chiquimulilla, Santa Rosa	125
53.	Ubicación de los aisladores FPT en el proyecto del hospital	127
54.	Ingreso para el diseño del aislador.....	139
55.	Definición del diseño del aislador	140
56.	Definición del diseño del aislador triple péndulo	141
57.	Propiedades direccionales	142
58.	Ingreso de datos de diseño en la dirección uno del aislador del hospital.....	142
59.	Ingreso de datos de diseño en la dirección uno del aislador de proyecto de escuela	143
60.	Ingreso de datos de diseño en la dirección dos y tres del proyecto de hospital.....	145
61.	Ingreso de datos de diseño en la dirección dos y tres del proyecto de la escuela	146
62.	Forma para dibujar el aislador tipo <i>springs</i>	147
63.	Forma para dibujar el aislador tipo link.....	148
64.	Ingreso de datos para vectores modal-ritz	149
65.	Ingreso de datos para historia de tiempo	150

66.	Curva de la histéresis de los aisladores en el proyecto de hospital	151
67.	Curva de la histéresis de los aisladores en el proyecto de la escuela	151
68.	Derivas de entrepiso en dirección X del proyecto del hospital utilizando línea de historia de la estación CESEM.....	153
69.	Derivas de entrepiso en dirección Y del proyecto del hospital utilizando línea de historia de la estación CESEM.....	155
70.	Derivas de entrepiso en dirección X del proyecto del hospital utilizando línea de historia de la estación San Cristóbal	157
71.	Derivas de entrepiso en dirección Y del proyecto del hospital utilizando línea de historia de la estación San Cristóbal	159
72.	Derivas de entrepiso en dirección X, Y del proyecto del hospital utilizando línea de historia de la estación CESEM.....	160
73.	Derivas de entrepiso en dirección X, Y del proyecto del hospital utilizando línea de historia de la estación San Cristóbal	160
74.	Desplazamientos de entrepiso en dirección X, Y del proyecto del hospital utilizando línea de historia de la estación CESEM	161
75.	Desplazamientos de entrepiso en dirección X, Y del proyecto del hospital utilizando línea de historia de la estación San Cristóbal.....	162
76.	Derivas de entrepiso en dirección X del proyecto de la escuela utilizando línea de historia de la estación CESEM.....	164
77.	Derivas de entrepiso en dirección X del proyecto de la escuela utilizando línea de historia de la estación San Cristóbal	165
78.	Derivas de entrepiso en dirección Y del proyecto de la escuela utilizando línea de historia de la estación CESEM.....	167
79.	Derivas de entrepiso en dirección Y del proyecto de la escuela utilizando línea de historia de la estación San Cristóbal	168
80.	Desplazamientos de entrepiso en dirección X, Y del proyecto del hospital utilizando línea de historia de la estación CESEM	169

81.	Desplazamientos de entrepiso en dirección X, Y del proyecto del hospital utilizando línea de historia de la estación San Cristóbal	170
82.	Derivas de entrepiso en dirección X con aisladores en la edificación del hospital utilizando línea de historia de la estación CESEM	172
83.	Derivas de entrepiso en dirección X con aisladores en la edificación del hospital utilizando línea de historia de la estación San Cristóbal .	174
84.	Derivas de entrepiso en dirección Y con aisladores en la edificación del hospital utilizando línea de historia de la estación CESEM	176
85.	Derivas de entrepiso en dirección Y con aisladores en la edificación del hospital utilizando línea de historia de la estación San Cristóbal .	178
86.	Derivas de entrepiso en dirección Y con aisladores en la edificación de la escuela utilizando línea de historia de la estación CESEM	180
87.	Derivas de entrepiso en dirección X con aisladores en la edificación de la escuela utilizando línea de historia de la estación CESEM	181
88.	Derivas de entrepiso en dirección X con aisladores en la edificación de la escuela utilizando línea de historia de la estación San Cristóbal	183
89.	Derivas de entrepiso en dirección Y con aisladores en la edificación de la escuela utilizando línea de historia de la estación San Cristóbal	185
90.	Diagrama de fuerzas cortantes para la superestructura en la edificación del hospital	186
91.	Diagrama de fuerzas cortantes para la superestructura en la edificación de la escuela	187
92.	Desplazamiento para el sismo máximo en dirección X, Y utilizando aisladores de la edificación hospital utilizando línea de historia de la estación CESEM	188

93.	Desplazamiento para el sismo máximo en dirección X, Y utilizando aisladores de la edificación hospital utilizando línea de historia de la estación San Cristóbal	189
94.	Desplazamiento para el sismo máximo en dirección X, Y utilizando aisladores de la edificación escuela utilizando línea de historia de la estación CESEM.....	190
95.	Desplazamiento para el sismo máximo en dirección X, Y utilizando aisladores de la edificación escuela utilizando línea de historia de la estación San Cristóbal	191

TABLAS

I.	Niveles de daño	4
II.	Dimensión estándar de las placas	55
III.	Factores Kd de acuerdo con el nivel del sismo.....	79
IV.	Derivas últimas máximas tolerables.....	81
V.	Elementos estructurales del edificio hospital	90
VI.	Características y las cargas adoptadas al edificio hospital	90
VII.	Datos para el espectro de respuesta San Pedro Pinula, Jalapa	91
VIII.	Datos para la obtención del espectro de respuesta de la edificación del hospital.....	93
IX.	Datos para la obtención del Ta	94
X.	Combinaciones de carga para el edificio	95
XI.	Masas y pesos por nivel del edificio.....	103
XII.	Modos de vibración del edificio	104
XIII.	Procedimiento para fuerza lateral equivalente	104
XIV.	Procedimiento Cs de no superar los límites establecidos de la norma (ASCE 7-16)	105

XV.	Procedimiento desplazamientos laterales mínimos de la norma (ASCE 7-16).....	107
XVI.	Procedimiento desplazamientos laterales máximos de la norma (ASCE 7-16).....	108
XVII.	Procedimiento desplazamiento total de diseño Dtm de la norma (ASCE 7-16).....	108
XVIII.	Procedimiento sistema de aislación de la norma (ASCE 7-16).....	109
XIX.	Procedimiento fuerza lateral mínima sub estructura (ASCE 7-16)....	110
XX.	Procedimiento fuerza lateral mínima superestructura (ASCE 7-16)..	111
XXI.	Límites de cortante (ASCE 7-16)	112
XXII.	Fuerza lateral de recuperación del aislador (ASCE 7-16).....	112
XXIII.	Diseño del péndulo interior para sismos frecuentes.....	113
XXIV.	Diseño de la rigidez efectiva total de todos los aisladores	114
XXV.	Diseño del péndulo interior para sismos de diseño	115
XXVI.	Diseño de la rigidez efectiva total de todos los aisladores en sismo de diseño.....	116
XXVII.	Diseño del péndulo superior para máximo sismo creíble	117
XXVIII.	Diseño de la rigidez efectiva total de todos los aisladores en sismo máximo creíble	118
XXIX.	Detalle del aislador FPT	119
XXX.	Elementos estructurales del edificio educativo.....	123
XXXI.	Características y las cargas adoptadas al edificio.....	124
XXXII.	Datos para el espectro de respuesta del edificio educativo	124
XXXIII.	Datos para la obtención del espectro de respuesta del edificio educativo.....	126
XXXIV.	Datos para la obtención del Ta, Cs del edificio educativo.....	126
XXXV.	Modos de vibración del edificio educativo	127
XXXVI.	Procedimiento para fuerza lateral equivalente del edificio educativo .	128

XXXVII.	Procedimiento Cs de no superar los límites establecidos de la norma (ASCE 7-16)	128
XXXVIII.	Procedimiento desplazamientos laterales mínimos de la norma (ASCE 7-16)	129
XXXIX.	Procedimiento desplazamientos laterales máximos de la norma (ASCE 7-16)	130
XL.	Procedimiento desplazamiento total de diseño Dtm de la norma (ASCE 7-16)	130
XLI.	Procedimiento fuerza lateral mínima sub estructura (ASCE 7-16).....	131
XLII.	Procedimiento fuerza lateral mínima superestructura (ASCE 7-16)...	131
XLIII.	Límites de cortante (ASCE 7-16)	131
XLIV.	Fuerza lateral de recuperación del aislador (ASCE 7-16).....	132
XLV.	Diseño del péndulo interior para sismos frecuentes	132
XLVI.	Diseño de la rigidez efectiva total de todos los aisladores.....	133
XLVII.	Diseño del péndulo interior para sismos de diseño	134
XLVIII.	Diseño de la rigidez efectiva total de todos los aisladores en sismo de diseño	134
XLIX.	Diseño del péndulo superior para máximo sismo creíble.....	135
L.	Diseño de la rigidez efectiva total de todos los aisladores en sismo máximo creíble.....	135
LI.	Detalle del aislador FPT.....	136
LII.	Datos de diseño dirección 2 y 3 de proyecto para el Hospital	144
LIII.	Datos de diseño dirección 2 y 3 de proyecto para la escuela	144
LIV.	Derivas de entrepiso en dirección X sin aisladores en la edificación del hospital utilizando línea de historia de la estación CESEM.....	152
LV.	Derivas de entrepiso en dirección Y sin aisladores en la edificación del hospital utilizando línea de historia de la estación CESEM.....	154
LVI.	Derivas de entrepiso en dirección X sin aisladores en la edificación del hospital utilizando línea de historia de la estación San Cristóbal ..	156

LVII.	Derivas de entrepiso en dirección Y sin aisladores en la edificación del hospital utilizando línea de historia de la estación San Cristóbal .	158
LVIII.	Derivas de entrepiso en dirección X sin aisladores en la edificación de la escuela utilizando línea de historia de la estación CESEM	163
LIX.	Derivas de entrepiso en dirección X sin aisladores en la edificación de la escuela utilizando línea de historia de la estación San Cristóbal	163
LX.	Derivas de entrepiso en dirección Y sin aisladores en la edificación de la escuela utilizando línea de historia de la estación CESEM	166
LXI.	Derivas de entrepiso en dirección Y sin aisladores en la edificación de la escuela utilizando línea de historia de la estación San Cristóbal	166
LXII.	Derivas de entrepiso en dirección X con aisladores en la edificación del hospital utilizando línea de historia de la estación CESEM	171
LXIII.	Derivas de entrepiso en dirección X con aisladores en la edificación del hospital utilizando línea de historia de la estación San Cristóbal .	173
LXIV.	Derivas de entrepiso en dirección Y con aisladores en la edificación del hospital utilizando línea de historia de la estación CESEM	175
LXV.	Derivas de entrepiso en dirección Y con aisladores en la edificación del hospital utilizando línea de historia de la estación San Cristóbal .	177
LXVI.	Derivas de entrepiso en dirección Y con aisladores en la edificación de la escuela utilizando línea de historia de la estación CESEM	179
LXVII.	Derivas de entrepiso en dirección X con aisladores en la edificación de la escuela utilizando línea de historia de la estación CESEM	179
LXVIII.	Derivas de entrepiso en dirección X con aisladores en la edificación de la escuela utilizando línea de historia de la estación San Cristóbal	182

LXIX. Derivas de entrepiso en dirección Y con aisladores en la edificación de la escuela utilizando línea de historia de la estación San Cristóbal.....184

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
G	Aceleración de la gravedad
β_{eff}	Amortiguamiento
μ_i	Coefficiente de fricción
B_M	Coefficiente numérico para amortiguamiento efectivo
D_D	Desplazamiento de diseño
D_m	Desplazamiento máximo
D_{tm}	Desplazamiento máximo total
P	Fuerza axial máxima
F_b	Fuerza de restauración
F_{res}	Fuerza de restauración
M_b	Masa base
T_B	Periodo de aislamiento
T	Periodo natural
T_D	Periodo objetivo
W	Peso de la estructura
R	Radio de la superficie cóncava
K_{eff}	Rigidez efectiva del sistema
K_b	Rigidez natural del aislador
DFP	Sistema de doble péndulo de fricción
SFP	Sistema de péndulo de fricción
EPS	Sistema de protección para terremoto
FPT	Sistema de triple péndulo de fricción
DBE	Terremoto o sismo de diseño

MCE

Terremoto o sismo máximo considerado

GLOSARIO

Aislamiento sísmico	Es una recolección de elementos estructurales para desacoplar una superestructura del edificio del suelo y de esta forma defender la totalidad del edificio.
Amortiguamiento	Es el proceso mediante el cual la amplitud de vibración disminuye de manera constante.
ASCE	Sociedad Americana de ingenieros civiles.
Daño	Son los que afectan al esqueleto del inmueble y tienen la posibilidad de llegar a ser responsables de derrumbes parciales o totales del edificio.
Daño severo	Daño estructural considerable y daño no estructural excesivo.
Deriva	Es el desplazamiento horizontal relativo entre dos puntos colocados en la misma línea vertical, en dos pisos o niveles consecutivos de la edificación.
ETABS	Análisis Tridimensional Extendido en Edificaciones.
Fricción	Relacionada con las fuerzas de rozamiento en un área rugosa.

Histéresis	Tendencia de un material a mantener sus características, en ausencia del estímulo que la ha generado.
Post-elástico	Efecto que se produce por la aplicación de cargas dinámicas que produce una deformación transitoria (en el tiempo) diferente a la obtenida en los ensayos cuasi estáticos.
Rigidez	Es la capacidad de soportar cargas sin deformarse o desplazarse excesivamente.
Sismos	Serie de vibraciones de la extensión de la tierra generadas por un desplazamiento brusco y repentino de las capas internas (corteza y manto).
UBC	Norma Norteamericana de la Construcción.

RESUMEN

El presente trabajo de investigación realiza el análisis sísmico con criterios de diseño para la funcionalidad continua en construcciones fundamentales, con el fin de minimizar el daño que logre padecer los elementos estructurales, no estructurales y elementos de una construcción ante sismos severos, a un daño menor.

Para esto se hace la comprobación si una estructura de base fija y base aislada poseen la función de conseguir los parámetros que instituye la funcionalidad continua. Comenzando con la recolección y adquisición de datos acerca de la funcionalidad continua y la conducta de los aisladores de tipo triple péndulo friccional.

La modelación y estudio sísmico para las condiciones presentadas se hace en el programa ETABS con el cual desde los resultados logrados se tendrá la posibilidad de validar o negar las hipótesis propuestas en el trabajo.

Llevando a cabo esta comprobación en la muestra de análisis de una construcción de 4 niveles con una configuración estructural a base de marcos dúctiles de concreto reforzado, en diferentes municipios en la cual se realiza la comprobación tomando en cuenta la estructura con base fija y para la misma implementada con el aislador FPT.

ANTECEDENTES

Según Reddy y Patil (2012) indica que en estructuras construidas en el pasado por causas como los terremotos han provocado la pérdida de vidas y propiedades e incalculables sufrimientos a los supervivientes de la zona afectada, esto ha obligado a los ingenieros y científicos a pensar en técnicas y métodos innovadores para salvar los edificios y estructuras de las fuerzas destructivas del terremoto. Proporcionado suficiente evidencia del desempeño de diferentes tipos de estructuras bajo diferentes condiciones de cimentación, esto ha dado lugar a diferentes tipos de técnicas.

Según en la publicación de Jaramillo (2019):

El sistema de aislamiento datan del siglo XIX luego de que el científico británico John Milne edificara su casa de madera sobre pilotes, los cuales tenían pequeñas esferas de hierro fundido sobre la cabeza de estos, en un comienzo, utilizó esferas de 254 mm de diámetro; sin embargo, luego de terminada la construcción se percató que su casa era fácilmente influenciada por las fuerzas de viento, esto permitió que Milne modificara su diseño hasta que finalmente incorporase esferas de menor diámetro (6 mm). (p. 15)

Este fue el primer paso que permitió futuros desarrollos de un sistema de aislamiento. Sin embargo, este método no se aplicó de manera moderna sino hasta la década de 1960, con la aparición de materiales con mejores propiedades como los elastómeros y su vulcanización intercalada con acero” según afirma. (Christopoulos y Filiatrault, 2006, p. 2)

El respaldo teórico y experimental que existe en estos sistemas, muestran estudios de importantes autores y universidades que permiten contar con datos confiables y comprobados, además estos estudios y pruebas se vienen realizando hace un buen tiempo (Akiyama, 2003, p. 8)

Según Taywade y Narayan (2015):

La primera estructura en el mundo en donde se implementó este sistema de aislamiento moderna fue el colegio Pestalozzi, ubicado en Macedonia del Norte, en la que se utilizaron aisladores elastoméricos luego en Japón inician a implementar lentamente estos sistemas a una razón de 10 edificios aislados por año. (p. 7)

La estructura se basa no solo en su propia fuerza para resistir la fuerza del terremoto, sino también en estos dispositivos o sistemas para disipar la energía dinámica, la tecnología de la estructura usando aisladores sísmicos se está convirtiendo en un atractivo alternativa para aumentar la seguridad estructural y la capacidad de servicio, ya que puede mejorar enormemente comportamiento sísmico de sistemas estructurales (Cheng, Hongping y Kangyu, 2008).

Según Flores y Ravelo (2019):

En 1978 se edificó en viaducto de Toe-toe en North Island, en Nueva Zelanda, esta fue la primera estructura con aisladores sísmicos realizado con capas intercaladas de caucho y acero con un núcleo de plomo en el centro para que ayude a disipar la energía, este tipo de aisladores llamados LRB (Lead Rubber Bearing) son de amplio uso actualmente. (p. 12)

Según Lafuente (2016):

En 1997 luego de un esfuerzo de 2 años, por parte de instituciones, se logró que las recomendaciones para el uso de aisladores sísmicos, emanadas tanto del UBC como de la NEHRP, fueran compatibilizadas, y a partir de ese momento se cuenta con propuestas basadas en los mismos criterios técnicos. (p. 18)

Las recomendaciones del International *Building*, incluidas en la edición de 1997 de *Uniform Building Code* (UBC) son casi idénticas a las recomendaciones del NEHRP *Recommended Provisions for Seismic Regulations of New Buildings*, para el aislamiento sísmico de edificaciones, a partir de ese documento de 1997, la publicación del UBC fue sustituida por la del IBC de 2000. (p. 18)

Según el informe de Aguilar, Almazán, Dechent, y Suárez (2008) “es importante considerar métodos estructurales como el aislamiento de la base que limita el daño de los componentes estructurales y no estructurales, logrando estructuras con un rendimiento superior niveles”. (p. 13)

Se debe estar al tanto de las características de cada estructura y efectuar su respectivo estudio con el fin de obtener resultados positivos. Los ensayos en distintas condiciones de estructuras, suelos, dimensiones y modificaciones en general son esenciales para el desarrollo de las nuevas tecnologías y es necesario adentrarse (Galan, 2013).

Asimismo, al criterio de Hussaini, Zayas y Constantinou (1994):

Cuya investigación experimental de un edificio de 6 pisos a escala sujeta a cargas sísmicas en una mesa vibratoria, dejó como conclusiones que los aisladores de péndulo friccional, reducen las fuerzas de corte de la estructura y las distorsiones o derivas entre los pisos en los modelos de edificios de varios niveles entre 4 a 6, lo que accede que el método estructural superior permanezca elástico durante las fuertes cargas sísmicas, eso permite que las limitaciones en las torciones reducen bastante el daño a elementos de edificios no estructurales y estructurales causados por los sismos a los cuales fue sometida la muestra. (p. 22)

Como lo informa Gamboa (2019):

Esta investigación describe la formulación, implementación y validación de modelos aisladores deslizantes multiesféricos cuando se configuran para mostrar un comportamiento adaptativo, los aisladores de péndulo de fricción (FP) dobles y triples presentan un comportamiento histerético que es más complejo que el que presentan los dispositivos de aislamiento sísmico actuales. (p. 10)

En el informe de Jaramillo (2019):

Las normas que establecen lineamientos para el diseño sismorresistente de estructuras incluyen en la definición de las magnitudes de los sismos de diseño, el concepto de vida útil de la estructura, en general esta vida útil ha sido establecida como de 50 años, para la mayoría de las edificaciones. (p. 24)

Los estudios en la ingeniería sísmo resistente han ido avanzando y dependen mucho de los ensayos y sistemas que se deciden analizar, al momento de realizar un estudio de una nueva tecnología se busca siempre el mejor comportamiento, en este caso se busca que la estructura sea lo más resistente posible y evitar el colapso. En el estudio de Galan (2013) se desarrolló el diseño del sistema de disipación de un edificio aporticado de 7 niveles según la guía de diseño sismorresistente, en donde se buscó que el edificio logre comportarse con daños moderados ante un terremoto con 500 años de periodo de retorno. La disipación de energía se da a través de introducir elementos en este caso aisladores sísmicos, para reducir los esfuerzos que soporta la estructura.

Según el informe de Fenz, y Constantinou (2007):

Los dispositivos de fricción doble y triple se denominan dispositivos de segunda y tercera generación respectivamente, y tienen algunas ventajas sobre la primera generación, tales como: más compacto, capaz de adaptar su rendimiento en relación a la demanda, mayor capacidad de desplazamiento y menor velocidad en el movimiento, lo que evita excesos variación en los coeficientes de fricción, otro aspecto notable de la segunda y dispositivos de tercera generación es la reducción de las reacciones de las estructuras, mejorando así el rendimiento de componentes y elementos no estructurales. (p. 21)

Según la Cámara Guatemalteca de la Construcción (2020), se encuentra en estos momentos en una de sus mejores etapas en Guatemala, ya que hay bastante demanda de proyectos inmobiliarios y a la vez existe la confianza y el interés de los inversionistas privados por desarrollar este tipo de obras.

Es necesario hacer la acotación que, hoy por hoy no existen normas que rijan específicamente la materia que ocupa este trabajo, hecho que implica que en todo caso, el desarrollo de estas pruebas técnicas, tendrían que guardar armonía con el espíritu de las Normas de Seguridad Estructural establecidas por la Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica AGIES (2018), las cuales persiguen concebir procedimientos eficientes y seguros de construcción, procurando durante el inicio del proceso de implementación de los ensayos, la creación paralela de las normas correspondientes, en las cuales se consigne técnica y profesionalmente, los procesos a seguir en el futuro; todo dentro del marco de la búsqueda de la excelencia profesional del país.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Falta de investigación sobre el uso de aisladores sísmicos de base friccional de triple péndulo FPT en Guatemala, ocasiona que no se utilice como opción para mejorar el desempeño estructural en construcciones.

En los últimos años, se han desarrollado diferentes métodos de diseños estructurales, los cuales incorporan dispositivos en las edificaciones para mejorar su comportamiento ante un evento sísmico. Es necesario dar a conocer el importante potencial que tienen los dispositivos de control de respuesta sísmica, y en particular los aisladores sísmicos en la protección de edificaciones.

Por la sencillez de sus mecanismos de funcionamiento y por su efectividad, han demostrado ser una alternativa confiable a considerar en el diseño sismorresistente y en los proyectos de readecuación sísmica, vista la necesidad de reducir daños en edificaciones.

El uso de los aisladores sísmicos permite resolver un conjunto importante de problemas asociados a la ingeniería sismorresistente. Han demostrado su eficacia para diseños de estructuras con altos requerimientos de desempeño y también son útiles para proyectos de refuerzo y rehabilitación de estructuras que, por sus características o antigüedad, no cumplen con los requisitos normativos vigentes a fin de garantizar niveles mínimos de seguridad y desempeño sísmico.

En la actualidad, la implementación del concepto de protección sísmica en nuestro país es incipiente, no solo porque son pocas las investigaciones realizadas, sino además porque se cree que involucra un aumento de costos en

la construcción, por lo tanto, estos diseños no se realizan constantemente, sin importar que las edificaciones se ubican en las zonas de mayor riesgo sísmico de Guatemala.

En el ámbito constructivo, no se cuenta con un modelo de infraestructura de más de cuatro niveles utilizando aisladores sísmicos de base friccional de triple péndulo FPT. Por lo anterior, es necesario tener una tecnología moderna que tenga funcionalidad continua y mayor seguridad sísmica.

Esta investigación es necesaria porque permite conocer un criterio de diseño con el cual se contribuye a diseñar estructuras de más niveles utilizando este tipo de aislador que ante un evento sísmico sus daños estructurales y no estructurales sean mínimos y permite aprovechar de los beneficios que puede aportar este nuevo sistema en el desempeño de la estructura.

Debido a la problemática del tema surge la pregunta central:

- Pregunta central
 - ¿Porque la falta de investigación sobre el uso de aisladores sísmicos de base friccional de triple péndulo FPT en Guatemala, ocasiona que no se utilice como opción para mejorar el desempeño estructural en construcciones?

- Preguntas secundarias
 - ¿Qué motiva el poco interés en el uso de aisladores sísmicos de base friccional de triple péndulo FPT en construcciones con la tipología analizada?

- ¿Qué efecto da en el desempeño estructural el uso del sistema de aisladores FPT?
- ¿Qué beneficios puede aportar el sistema de aisladores FPT en las construcciones en la zona de mayor riesgo sísmico de Guatemala?

OBJETIVOS

General

Diseñar una estructura de cuatro niveles empleando aisladores sísmicos de base friccional de triple péndulo para la zona de mayor vulnerabilidad sísmica de Guatemala.

Específicos

1. Establecer criterios y un procedimiento de diseño de aisladores FPT.
2. Exponer los beneficios obtenidos al insertar los aisladores en el edificio de cuatro niveles.
3. Presentar ventajas determinantes de la importancia de la aislación sísmica en edificaciones.
4. Fomentar el uso de nuevas tecnologías sismo-resistente en las zonas de mayor riesgo sísmico de Guatemala.

HIPÓTESIS

El sistema de aisladores de base friccional FPT permitirá reducir los esfuerzos y deformaciones en una edificación de cuatro niveles en la zona de mayor riesgo sísmico de Guatemala.

RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO

Este proyecto será de dos tipos: descriptiva y exploratoria, va a ser descriptiva porque investigará la bibliografía necesaria de su uso de este tipo de aislador de base friccional de triple péndulo FPT y nos permitirá conocer un criterio de diseño con el cual se contribuye a diseñar estructuras de más niveles utilizando este tipo de aislador que ante un evento sísmico sus daños estructurales y no estructurales sean mínimos.

Su diseño va a ser de carácter experimental porque se estudiará el comportamiento de un edificio de cuatro niveles utilizando este tipo de aislador con las normas de la construcción que se utilizan en Guatemala y que permitirá exponer los beneficios obtenidos al insertar este tipo de aislador, también fomentar el uso de nuevas tecnologías antisísmicas en las zonas de mayor riesgo sísmico de Guatemala.

Los indicadores de este trabajo son de carácter cuantitativo porque nos permite conocer dos cosas: el análisis sísmico utilizando el aislador FPT y un procedimiento de diseño de dicho aislador en una edificación de cuatro niveles que permita reducir la demanda sísmica en la estructura mediante un mecanismo pendular y friccional, que se trata específicamente de elegir las propiedades principales que debe tener el aislador (esto es: radios de curvatura y coeficientes de fricción), así como también el tamaño que debe tener el aislador hablando en términos de capacidad de desplazamiento y así no elevar sustancialmente los costos y además permite presentar ventajas determinantes de la importancia de la aislación sísmica en edificaciones para fomentar el uso de esta nueva tecnología antisísmica en las zonas de mayor riesgo sísmico de Guatemala.

INTRODUCCIÓN

Desde hace varios años, los sismos están dañando las estructuras en la zona de mayor riesgo de Guatemala, los cuales representan un peligro latente que causa daños permanentes tanto en las cimentaciones como en la superestructura. Para eso, es necesario diseñar estructuras que resistan fuerzas sísmicas, sin embargo, es importante hacer construcciones que puedan resistir sismos de alta magnitud, donde las estructuras puedan tener una gran capacidad de deformación, y que inclusive, vaya más allá de su estado elástico.

La incorporación y uso cada vez más difundido de aisladores sísmicos en la actualidad, constituye una innovación en el campo de la ingeniería sísmica para la protección de edificaciones y en lograr que las estructuras puedan prestar los servicios para los cuales han sido construidas, de manera segura y confiable, y continuar operativas de manera inmediata luego de ocurrido un terremoto.

Esta investigación se centró en los aisladores de base de triple péndulo de fricción FPT, donde se combinan la fricción y la geometría de las placas superficiales. Sus ventajas sobre el uso de este tipo de aislador son: más compacto, capaz de adaptar su rendimiento en relación con la demanda, mayor desplazamiento capacidad y menor velocidad en el movimiento, lo que evita excesos en la variación de los coeficientes de fricción. Un aspecto notable sobre el uso del aislador FPT es la reducción de respuestas estructurales, mejorando así el desempeño de componentes y elementos no estructurales.

Por lo anterior, en el capítulo 1 se tratará de una breve historia de la ingeniería estructural sobre el uso de aisladores, los conceptos de sismología,

estructura de la tierra, la teoría de las placas tectónicas y una breve introducción de las zonas sísmicas, se dará una explicación de los aisladores de base friccional se hablará los aisladores de primera, segunda y tercera generación sus fases de movimiento, sus fórmulas y las curvas de histéresis en los tres tipos de aisladores.

El capítulo 2 se procedió a realizar la explicación del procedimiento para hacer el diseño de un aislador FPT, su objetivo del diseño y ubicación del aislador, la interfaz del aislador su capacidad de desplazamiento y el contacto del fabricante y nomenclatura del aislador.

En el capítulo 3 se realizará su explicación de cómo se realizó el análisis sísmico en la zonificación de mayor riesgo en Guatemala con el normativo de la Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica y realizando su respectivo análisis usando el Software ETABS.

El capítulo 4 se realizará dos modelos de edificios de cuatro niveles utilizando este tipo de aislador FPT para demostrar que efectivamente logran reducir la demanda sísmica en una edificación, con lo cual se da la posibilidad de diseñar estructuras elásticas que no requieren incursionar en el rango inelástico, y finalmente el capítulo 5 se da los resultados, protegiendo de esta manera la integridad de la estructura y de sus ocupantes y que dentro de un futuro se pueda fomentar el uso de nuevas tecnologías sismo-resistente en edificios esenciales en las zonas de mayor riesgo sísmico de Guatemala.

1. RESEÑA DE LA INGENIERÍA ESTRUCTURAL SOBRE LOS AISLADORES SÍSMICOS

Según cita Molina (1995):

La ingeniería estructural es la combinación de una serie de conceptos que, considerados de manera integrada, que nos permite el diseño de una construcción capaz de resistir los efectos de los sismos razonablemente más fuertes que se puedan presentar en el futuro en un lugar dado. (p. 25)

El diseño estructural se debe asegurar que el edificio resistirá deflexiones extremas que puedan generar fatiga en los elementos estructurales o causar fallas en los accesorios y tabiques en si la ciencia de la ingeniería estructural se utiliza en la construcción de puentes, movimientos de tierra, cimientos, presas, carreteras y otras estructuras.

Una estructura básicamente incluye columnas, vigas, arcos y otros elementos, por ese motivo la ingeniería estructural esencialmente utiliza pruebas físicas, modelado y simulación por computadora para crear estructuras que son seguras y económicas.

Debido al rápido crecimiento de la tecnología informática y otras ciencias, ha habido un avance radical en la ciencia de la ingeniería estructural en la historia se han creado ordenadores capaz que nos han permitido el uso del análisis por medio computacional, para realizar el diseño y análisis estructural, los programas de análisis pueden prever con precisión la distribución de tensiones en estructuras e indicar dónde las estructuras pueden doblarse o torcerse debido a

estas tensiones, en sí, estos programas ofrecen numerosas opciones de simulación en el campo del modelado y análisis de diferentes sistemas, en ese sentido de esta investigación se va a ver los aisladores de base que es una nueva tecnología para reducir los efectos destructivos de un sismo.

1.1. Ingeniería sísmica

Citando a Coburn y Spence (2002) al referirse a la vulnerabilidad en una estructura se puede definir “como el grado de pérdida de un elemento determinado en riesgo ya sea en edificios, casas, estructuras metálicas entre otras y da como resultado de la ocurrencia de un terremoto” (p. 35).

Barbat (1994) hace mención que:

Un gran porcentaje de la población mundial vive en zonas de alto riesgo sísmico, donde los movimientos del terreno son las causantes de pérdidas de humanas y materiales, por este motivo en los últimos años se han desarrollado diferentes procedimientos de diseño de estructuras orientadas a mitigar sus efectos, siendo el aislamiento de base uno de estos procedimientos. (p. 9)

Por su parte Lafuente, (2016) indica que:

Los sistemas más utilizados en la actualidad para controlar la respuesta sísmica de las estructuras se basan en mecanismos de aislamiento sísmico y disipación de, esto en general, los sistemas tienen como objetivos principales, los de mantener la funcionalidad de la estructura, mejorar el confort de los ocupantes del edificio en caso de sismos, y

proporcionar protección sísmica adicional en la ocurrencia de eventos severos. (p. 98)

1.2. Aisladores sísmicos

Según Saquicela (2016) indica que:

El aislamiento sísmico es un conjunto de elementos estructurales, para desarticular una superestructura de un edificio de su tierra y así proteger la integridad del edificio, estos elementos trabajan de forma que absorben mediante deformaciones elevadas de energía que transmite el sismo a una estructura. (p. 22)

Se ha comprobado que el aislamiento de base es una de las herramientas más eficaces de la ingeniería sismorresistente, ya que permite un control neutral de la oscilación de la estructura considerablemente, recalcando que el aislamiento de base no vuelve a la edificación un elemento a prueba de terremotos. (p. 22)

Como lo cita Lafuente (2016):

Los aisladores sísmicos se pueden emplearse con la finalidad de obtener una utilidad en los proyectos estructurales y se puede orientar el diseño a alcanzar estándares más exigentes, que apunten, a preservar las vidas y la seguridad de las personas, a limitar los daños en la estructura y sus instalaciones y garantizar su operatividad inmediata luego de ocurrido un terremoto. (p. 28)

1.3. Aisladores de base

Según Lafuente, (2016) un aislador sísmico es:

Un elemento muy flexible que se coloca entre la estructura y la fundición, a fin de transmitir la menor cantidad de movimiento a la estructura, en el momento de ocurrencia de un terremoto. De no existir el aislador, la fundación transmitiría gran cantidad de vibraciones a la estructura; al colocar el aislador, disminuyen las vibraciones en la estructura. (p. 28)

Según afirma Espinel y Herrera (2013), “los daños que produce un sismo en una estructura van desde daños en la mampostería y una ligera afectación a columnas, muros de corte hasta el colapso total de la estructura” (p. 18).

Según cita Saquicela (2016), “los daños que produce un sismo en una estructura van desde daños en la mampostería y una ligera afectación a columnas, muros de corte hasta el colapso total de la estructura” (p. 8), como se describe en la siguiente tabla:

Tabla I. **Niveles de daño**

Nivel de Daño	Daños de elementos
Daño Ligero	Las columnas, muros de corte o muros no estructurales están ligeramente dañados.
Daño Moderado	Se encuentran agrietamientos típicos de corte y flexión en columnas, agrietamientos de corte en muros de corte o daño severo en muros no estructurales.
Daño Severo	Desprendimiento de concreto, pandeo del esfuerzo y aplastamiento o falla por cortante en columnas. La resistencia lateral de los muros de corte es reducida debido al agrietamiento severo por corte.

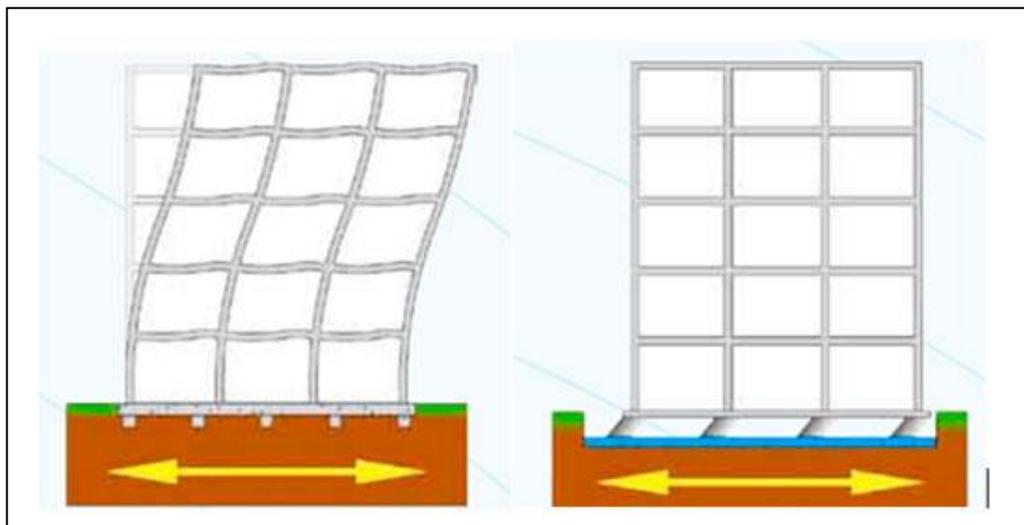
Continuación de la tabla I.

Nivel de Daño	Daños de elementos
Daño Parcial	La edificación es parcialmente colapsada debido a columnas y/o muros de corte fuertemente dañadas.
Daño Total	La edificación es totalmente colapsada debido a columnas y/o muros de corte fuertemente dañadas.

Fuente: NEC (2014). *Norma ecuatoriana de la construcción*

Según en la publicación de Lafuente (2016) “un aislador sísmico es un elemento muy flexible que se coloca entre la estructura con la finalidad de transmitir la menor cantidad de movimiento a la estructura, en el momento de ocurrencia de un terremoto” (p. 58). En la figura 1 se logra examinar la implementación de aisladores sísmicos en una obra de edificación.

Figura 1. **Edificio sin aislador y con aislador de base**



Fuente: Escuela Abierta de Desarrollo en Ingeniería y Construcción (2019). *Rol de aislamiento en la estructura*. Consultado el 4 de abril de 2021. Recuperado de <https://www.eadic.com/rol-del-aislamiento-de-base-en-las-estructuras/>

Según la Escuela Abierta de Desarrollo en Ingeniería y Construcción (2019) los aisladores deben tener indispensablemente estas características “gran rigidez vertical y elevada flexibilidad horizontal, para poder absorber la mayor parte de las cargas laterales inducidas por el sismo, la capacidad necesaria para resistir el peso de la estructura, elevada capacidad de amortiguamiento o disipación de energía” (p. 88).

También cita que los ciclos de histéresis estables, durabilidad ante el efecto de los diversos agentes externos, facilidad de mantenimiento, en el caso de los edificios, el ahorro económico se produce más a largo plazo, durante la vida útil de la estructura.

En el informe de Puchaicela (2018) en la actualidad:

Existen 2 tipos principales de aisladores de base, los LRB (*Lead Rubber Bearing*) y los FPS (*Friction Pendulum System*), cada uno con principios de funcionamiento y mecanismos de disipación de energía diferentes, en este caso de FPS, existen 3 tipos de aisladores, el simple, doble y triple péndulo de fricción. (p. 16)

Se va explicar una breve información de los aisladores de base pendular que comprende los aisladores de simple, doble péndulo y triple péndulo de fricción.

1.3.1. Sistema de péndulo de fricción

Según Puchaicela (2018) “el sistema de aislamiento sísmico de péndulo de fricción está diseñado para alargar el período estructural lejos de la frecuencia

dominante del movimiento del suelo y para dispersar la energía de vibración durante un terremoto” (p. 32).

Según Moreno, Yamín y Reyes (2005):

Los sistemas de péndulo de fricción suministran resistencia y estabilidad más allá de la prestada por los elastómeros, porque sus propiedades no se afectan con el paso de los años y la temperatura, así mismo su bajo perfil de los apoyos, su alta resistencia, y su gran rigidez vertical reducen los costos de instalación. (p. 11)

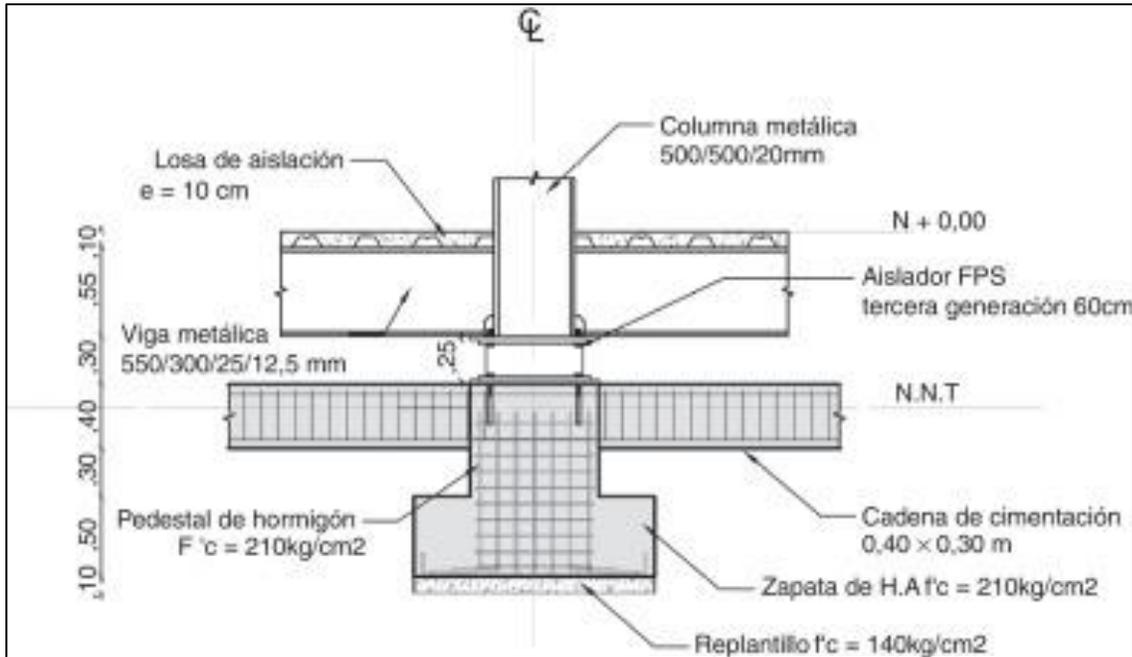
En la figura 2 se puede observar unos de los primeros detalles de la unión de una columna de acero en la parte superior del aislador FPS de primera generación.

Las propiedades de deslizamiento de los materiales de la superficie son clave para el rendimiento del sistema de aislamiento. Según cita Eroz y DesRochesb (2008):

El aislador consta de una superficie esférica de acero inoxidable y un deslizador, cubiertos por un material compuesto a base de teflón, mientras hay movimiento del suelo el control deslizante se mueve sobre la superficie esférica levantando la estructura y disipando la energía por fricción entre la superficie esférica y el deslizador por ese motivo el aislador utiliza la curvatura de su superficie para generar la fuerza de restauración de la acción pendular del peso de la estructura sobre el aislador. (p. 15)

La figura 2 se puede observar unos de los primeros aisladores de péndulo de fricción.

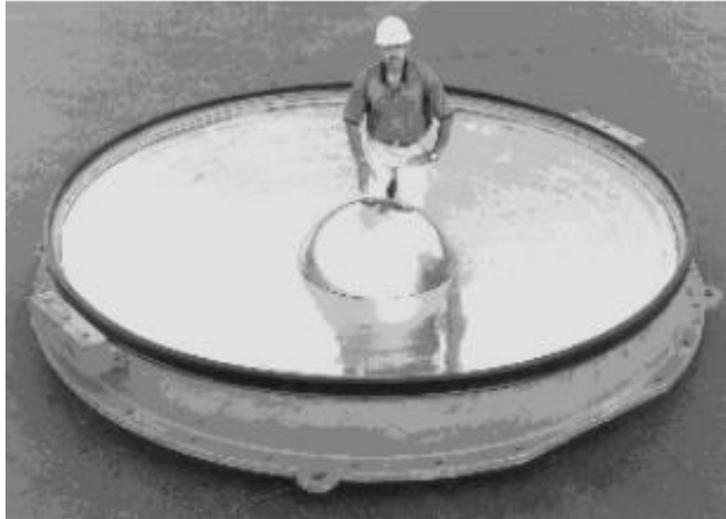
Figura 2. **Detalle de unión de una columna de acero en la parte superior del aislador FPS y hormigón en la parte inferior**



Fuente: Aguilar, Almazán, Dechent y Suarez (2008). *Aisladores de base elastomericos y FPS*.

Eso da entender en el informe Saquicela (2016) que “la fuerza de fricción dinámica genera el amortiguamiento necesario para absorber la energía de entrada, por esa consecuencia, las fuerzas y movimientos laterales transmitidos a la estructura se reducen en gran proporción” (p. 25).

Figura 3. **Aislador de Péndulo de fricción**



Fuente: Molina, A. (1995). *Ingeniería Sísmica*.

Zayas (1985), propuso:

Que el diseño de estos elementos es simplificado por el hecho de que, en el periodo del aislador, la capacidad de carga vertical, el amortiguamiento, la capacidad de desplazamiento y su capacidad a tensión pueden seleccionarse de forma independiente, por eso el periodo natural (T) del aislador se selecciona definiendo el radio de curvatura de la superficie cóncava (R). (p. 3)

Así con esta ecuación:

$$T=2\pi \sqrt{\frac{R}{G}} \quad (01)$$

Fuente: Molina, A. (1995). *Ingeniería Sísmica*.

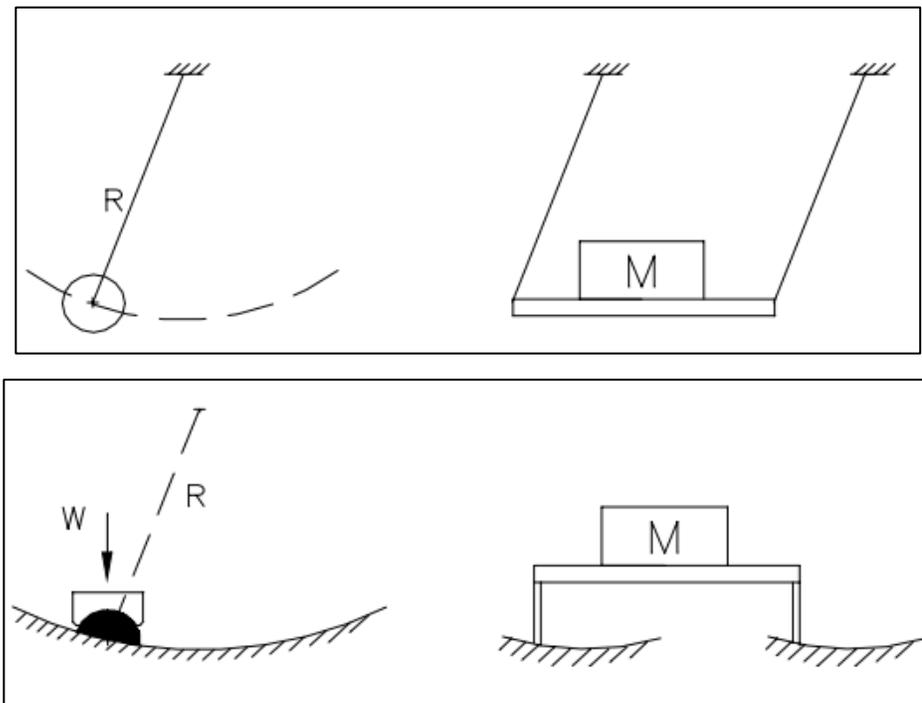
Según cita Luna (2005) “esta ecuación se puede observar que G es la aceleración de la gravedad y K_b es la rigidez lateral del aislador” (p. 84). La capacidad de restauración que proporciona el sistema es dada por esta ecuación donde W es el peso de la estructura:

$$K_b = \frac{W}{R} \quad (02)$$

Fuente: Molina, A. (1995). *Ingeniería Sísmica*.

En la figura 4 en la primera imagen se observa el movimiento pendular y en la segunda imagen el movimiento de péndulo deslizante del aislador.

Figura 4. **Inicio del funcionamiento de aisladores péndulo de fricción**

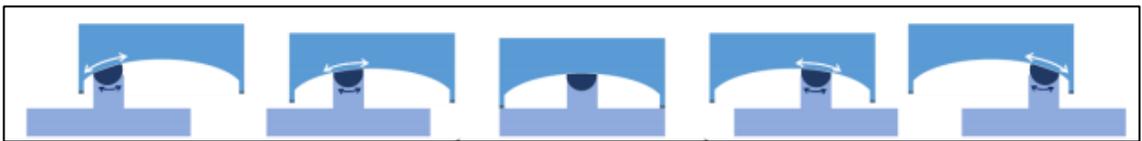


Fuente: Amaral (2013). *Effect of vertical component of earthquake on the response*

Según el informe de Amaral (2013) durante:

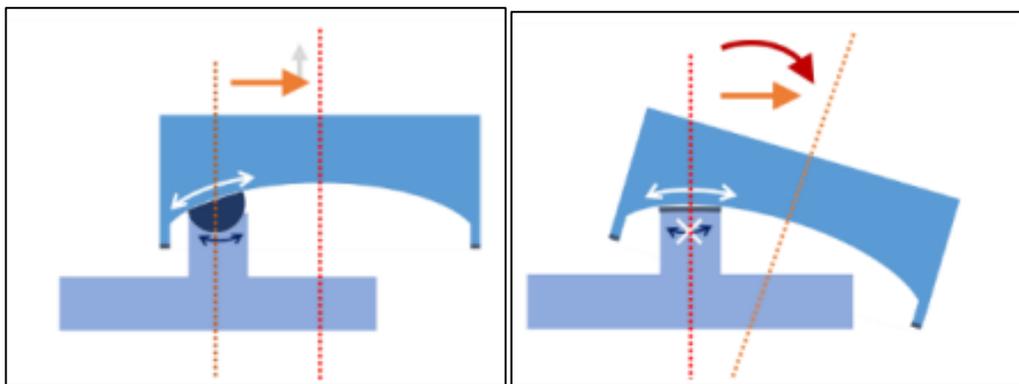
Un movimiento severo del suelo, el control deslizante se mueve sobre la superficie esférica levantando la estructura y disipando energía por fricción entre la superficie esférica y el control deslizante, el peso del edificio es soportado por el deslizador articulado que permite la superestructura eje vertical para permanecer vertical. (p. 26).

Figura 5. **Movimiento característico del sistema de péndulo de fricción**



Fuente: Amaral (2013). *Effect of vertical component of earthquake on the response.*

Figura 6. **Función de la junta en el sistema de péndulo de fricción**



Fuente: Amaral (2013). *Effect of vertical component of earthquake on the response.*

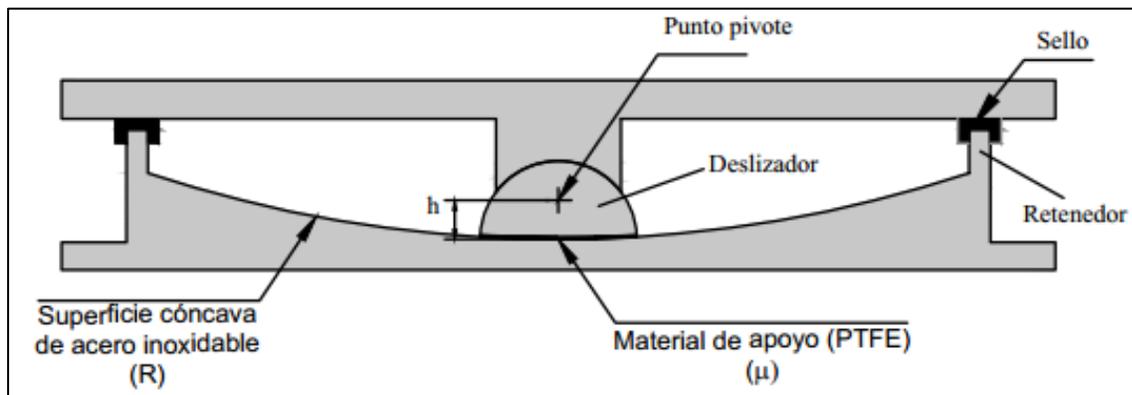
1.3.2. Simple péndulo de fricción (SFP)

Según cita Aguilar, Almazán, Dechent, y Suarez (2008) “el aislador de simple péndulo de fricción (SFP, *Single Friction Pendulum*) está formado por un deslizador articulado que descansa sobre una superficie cóncava de acero inoxidable” (p. 17).

Según Aguilar, Almazán, Dechent y Suarez (2008):

El deslizador contiene en su base una capa de material PTFE (teflón) que tiene un coeficiente de fricción bajo, en los bordes se encuentra el anillo de retención, además, existe un material sellante que hermetiza la parte interna del aislador y de esta manera se evita la contaminación y deterioro de los componentes ante efectos ambientales. (p. 18)

Figura 7. Parte de un aislador simple péndulo de fricción



Fuente: Aguilar, Almazán, Dechent y Suarez (2008). *Aisladores de base elastomericos y FPS.*

En el trabajo de Puchaicela (2018) los “dos parámetros que gobiernan el comportamiento del aislador SFP: la fricción que existe en la base del deslizador (μ) y el radio de curvatura de la superficie cóncava (R)” (p. 7).

Cuando el movimiento del suelo es lo suficientemente fuerte, la fuerza F excede la fuerza de fricción F_f , se produce el deslizamiento, durante el movimiento, si el desplazamiento horizontal u excede la capacidad de desplazamiento del rodamiento d , el límite duro circunferencial evita el desplazamiento del rodamiento. La fuerza de impacto F_r se proporciona para evitar el deslizamiento, los componentes de la fuerza y los desplazamientos horizontales, cuando el desplazamiento horizontal del deslizador es u , la relación de la fuerza y el desplazamiento horizontal del rodamiento se establece sobre la base del equilibrio de fuerzas.

Considerando el equilibrio de la fuerza horizontal y vertical en el desplazamiento horizontal u del deslizador, las siguientes relaciones se obtienen de la siguiente manera, respectivamente:

$$F = F_n \sin \theta + F_f \cos \theta \quad (03)$$

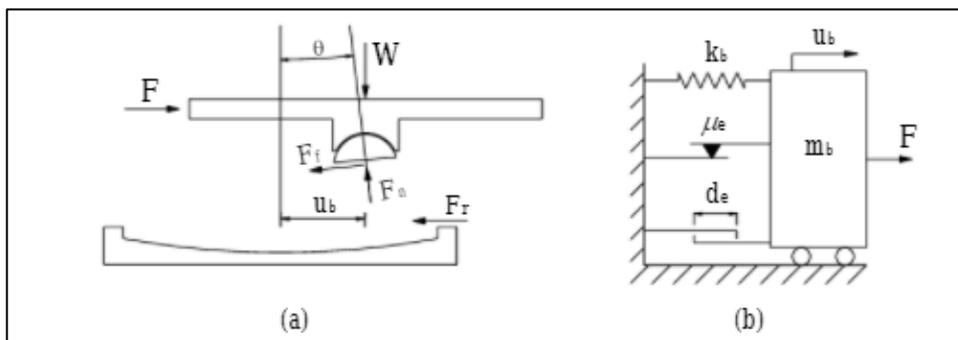
Fuente: Nguyen, Hoang y Huong (2018). *Performance of Single Friction Pendulum bearing for isolated buildings.*

$$W = F_n \cos \theta - F_f \sin \theta \quad (04)$$

Fuente: Nguyen, Hoang y Huong (2018). *Performance of Single Friction Pendulum bearing for isolated buildings.*

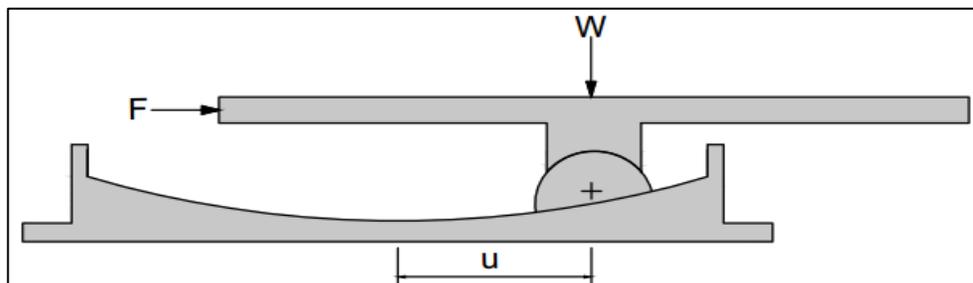
Donde: F_n es la energía de reacción de la superficie curva al deslizador, el componente de la fuerza de fricción es F_f y θ es el ángulo de giro del control deslizante como se aprecia en la figura 8.

Figura 8. **El modelo de rodamiento SFP. (a) Las fuerzas y el desplazamiento, (b) Modelo numérico**

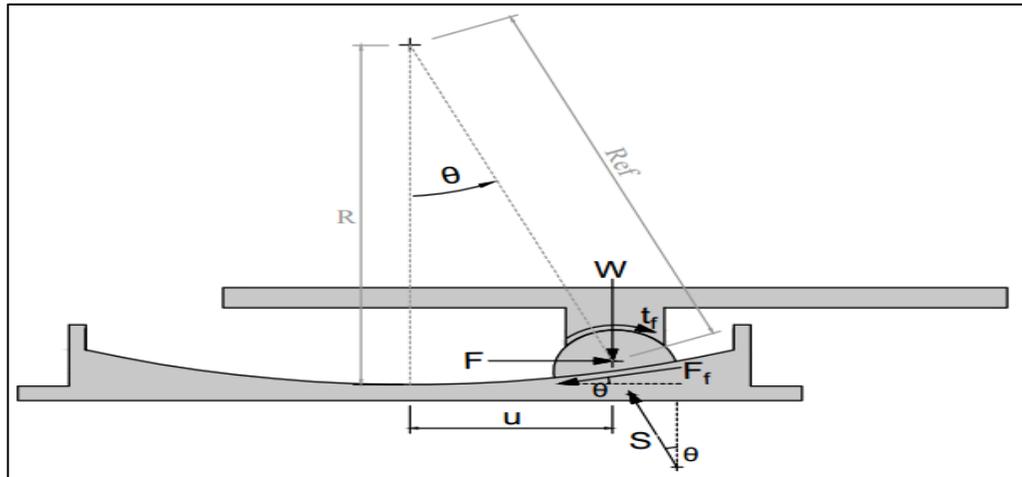


Fuente: Nguyen, Hoang y Huong (2018). *Performance of Single Friction Pendulum bearing for isolated buildings.*

Figura 9. **Aislador simple péndulo de fricción en posición deformada y diagrama de cuerpo libre**



Continuación de la figura 9.

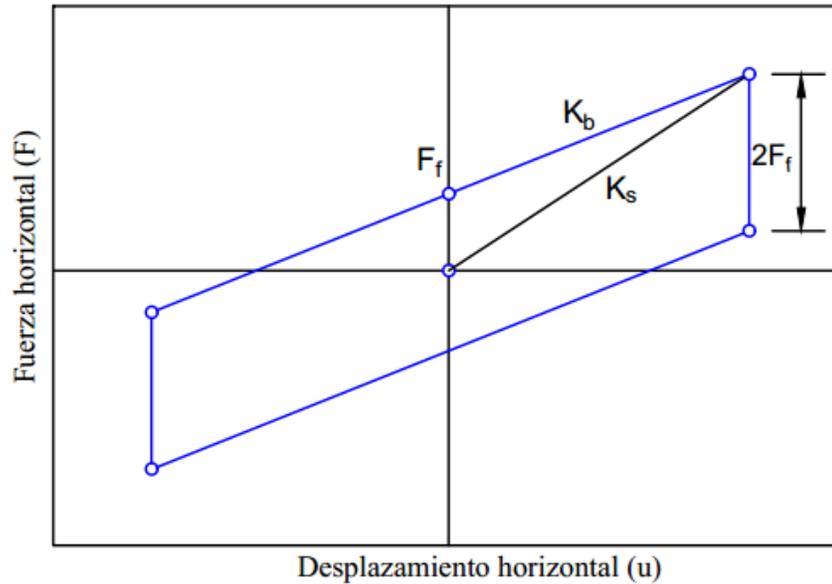


Fuente: Fenz y Constantinou (2008). *Development, Implementation and Verification of Dynamic Analysis Models for Multi-Spherical Sliding Bearings*.

Según la investigación de Zayas, Low y Mahin (1987) da a entender que:

Se nota que la rigidez (K_b) es directamente proporcional a la carga (W), esto implica que el centro de rigidez del sistema de aislamiento coincide con el centro de masa de la estructura y por lo tanto permite minimizar los movimientos torsionales en las estructuras. (p. 21)

Figura 10. **Curvatura de histéresis del aislador simple péndulo fricción**



Fuente: Fenz y Constantinou (2007). *Mechanical Behavior of Multi-Spherical Sliding Bearings*. Consultado el 4 de abril de 2021. Recuperado de <http://mceer.buffalo.edu/publications/catalog/reports/Mechanical-Behavior-of-Multi-Spherical-Sliding-Bearings-MCEER-08-0007.html>

Cita Puchaicela (2018) que “demuestra que el periodo de una estructura aislada con aisladores SFP, y en general para los FPS, solo depende del radio de curvatura efectivo, esto quiere decir que se puede ajustar el periodo objetivo eligiendo únicamente un radio efectivo” (p. 22).

1.3.3. Doble péndulo de fricción (DFP)

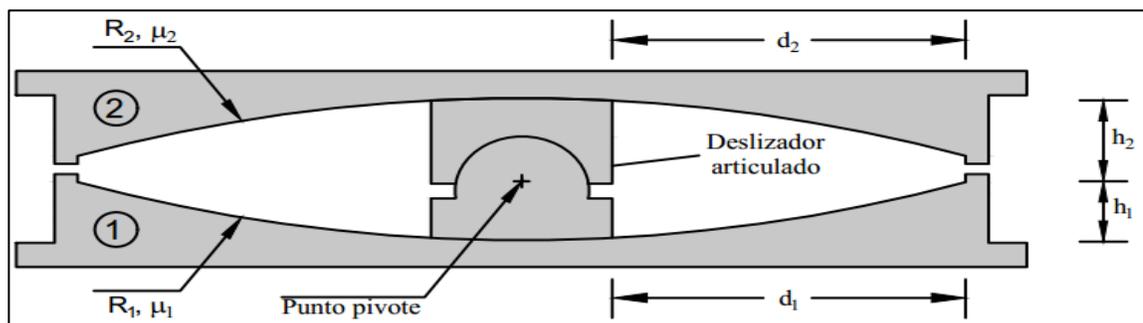
Según cita Puchaicela (2018):

El aislador de doble péndulo de fricción (DFP, *Double Friction Pendulum*) está formado por dos placas con superficies cóncavas de acero inoxidable, y de un deslizador articulado, la superficie cóncava inferior, con radio de

curvatura R_1 , coeficiente de fricción μ_1 y capacidad de desplazamiento d_1 ; y la superficie cóncava superior con radio de curvatura R_2 , coeficiente de fricción μ_2 y capacidad de desplazamiento d_2 . (p. 24)

La articulación es necesaria para la distribución adecuada de la presión sobre las superficies deslizantes y para acomodar movimientos diferenciales a lo largo de las superficies de deslizamiento superior e inferior.

Figura 11. Partes principales del aislador doble péndulo de fricción



Fuente: Constantinou, Kalpakidis, Filiatrault y Lay (2011). *LRFD Based Analysis and Design Procedures for Bridge Bearings and Seismic Isolators*.

Según cita Malekzadeh y Taghikhany (2010) reconoce dos ventajas principales del aislador doble péndulo de fricción con relación al aislador simple péndulo de fricción:

El primero es la reducción de las dimensiones en planta, esto a razón de que la capacidad de desplazamiento viene a ser la combinación de la capacidad de desplazamiento de dos placas; y segundo la posibilidad optimizar el diseño para dos valores de demanda sísmica, ya que el aislador

posee dos péndulos que pueden cambian de rigidez y amortiguamiento con el incremento de la demanda sísmica. (p. 25)

Según Puchaicela (2018):

Un aislador DFP estándar se identifican dos fases de movimiento, en eso la primera fase el deslizador se mueve únicamente a lo largo de la superficie 1 y en la segunda fase el deslizador se mueve simultáneamente en las dos superficies. (p. 25)

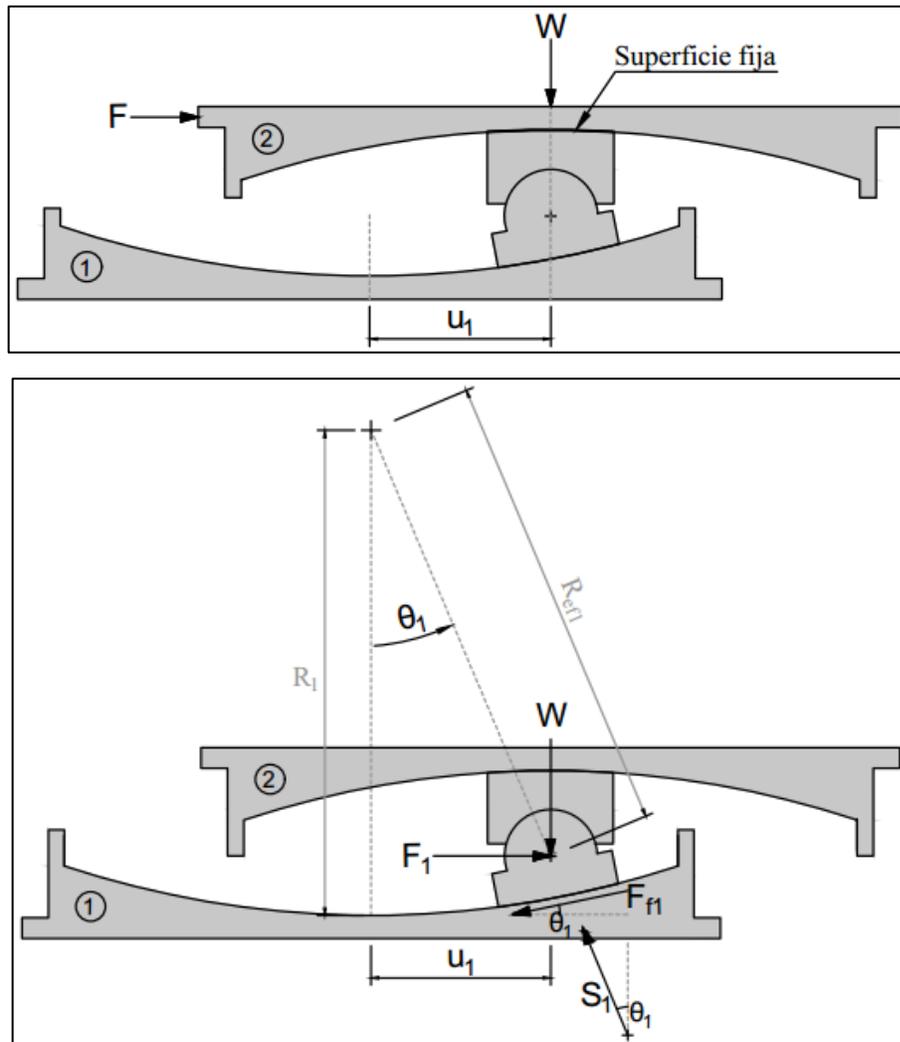
1.3.3.1. Ciclo I del aislador

Según cita Puchaicela (2018):

La fase I inicia cuando la fuerza horizontal (F) supera la fuerza de fricción en la superficie 1 (Ff_1) (menor coeficiente de fricción), en esta fase, el deslizador se desliza solo en la superficie 1 (placa 1), permaneciendo fijo en la superficie 2 (placa superior). (p. 25)

La figura 12 se puede apreciar la posición deformada y el diagrama de cuerpo libre.

Figura 12. **Ciclo I del aislador doble péndulo de fricción**



Fuente: Fenz y Constantinou (2007). *Mechanical Behavior of Multi-Spherical Sliding Bearings*. Consultado el 4 de abril de 2021. Recuperado de: <http://mceer.buffalo.edu/publications/catalog/reports/Mechanical-Behavior-of-Multi-Spherical-Sliding-Bearings-MCEER-08-0007.html>

Por lo tanto, lo que afirma Puchaicela (2018) que “la ecuación que gobierna el comportamiento para la fase I del aislador DFP es el mismo que del aislador SFP, pero con radio efectivo Ref_1 y coeficiente de fricción μ_1 ” (p. 25).

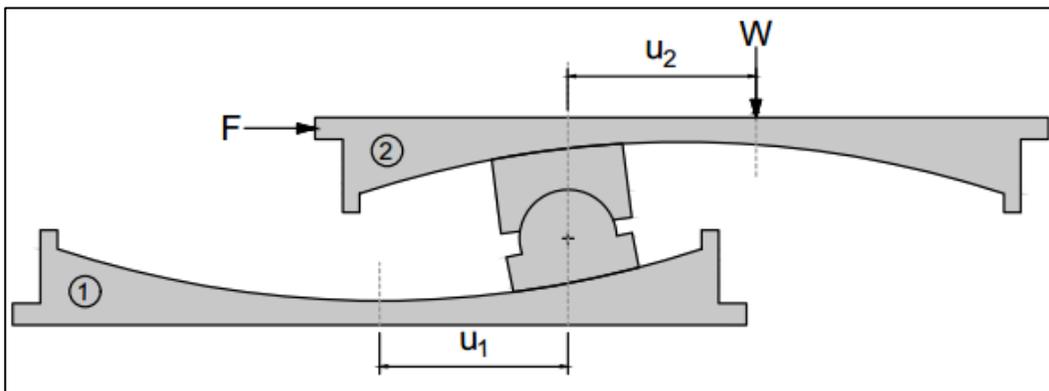
1.3.3.2. Ciclo II del aislador

Según Puchaicela, (2018):

La fase II empieza cuando la fuerza horizontal (F) supera la fuerza de fricción en la superficie 2 (Ff_2), por ese motivo en esta fase se da el deslizamiento en la superficie 2, pero sin detenerse en la superficie 1, dando lugar deslizamiento simultáneo en las dos superficies cóncavas. (p. 26)

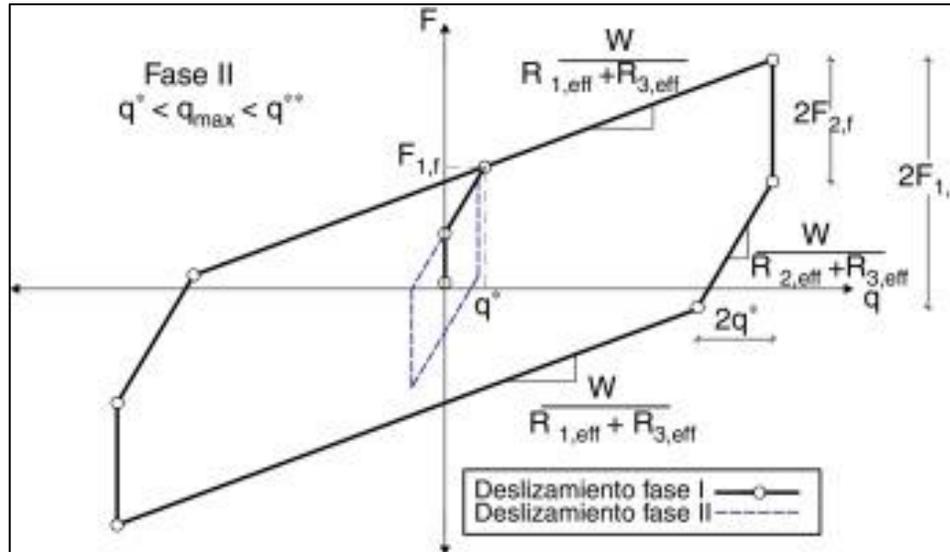
En la figura 13 se muestra el aislador Doble Péndulo de Fricción con su respectiva deformación respectivo a la fase II.

Figura 13. Fase II del aislador doble péndulo de fricción



Fuente: Fenz y Constantinou (2007). *Mechanical Behavior of Multi-Spherical Sliding Bearings*. Consultado el 4 de abril de 2021. Recuperado de: <http://mceer.buffalo.edu/publications/catalog/reports/Mechanical-Behavior-of-Multi-Spherical-Sliding-Bearings-MCEER-08-0007.html>

Figura 14. **Curvatura de la histéresis del aislador doble péndulo de fricción**



Fuente: Fenz y Constantinou (2007). *Mechanical Behavior of Multi-Spherical Sliding Bearings*. Consultado el 4 de abril de 2021. Recuperado de: <http://mceer.buffalo.edu/publications/catalog/reports/Mechanical-Behavior-of-Multi-Spherical-Sliding-Bearings-MCEER-08-0007.html>

1.3.4. Triple péndulo de fricción (FPT)

Según cita Fenz y Constantinou (2008) “el aislador de triple péndulo de fricción es la última versión de los aisladores de péndulo de fricción que ha desarrollado *Earthquake Protection System (EPS)*” (p. 18).

Se cita Fenz y Constantinou (2008) que “el aislador consta de un deslizador rígido (*Rigid Slider*) y de cuatro placas con superficies cóncavas (dos placas internas (placa 2 y 3) y dos placas externas (placa 1 y 4))” (p. 18).

La ecuación de movimiento para cada etapa de deslizamiento del aislador triple péndulo es encontrada a partir de las ecuaciones de equilibrio de los cojinetes que utiliza así mismo un enfoque idéntico a que siguió para el rodamiento pendular de fricción simple. Las transiciones en el comportamiento ocurren cuando o se alcanza la resistencia a la fricción de un deslizador o la capacidad de desplazamiento de un deslizador se alcanza, dando lugar a diferentes etapas de deslizamiento. Por ese motivo tiene 5 ciclos de movimiento.

La información dada por Fenz y Constantinou (2008) “en total posee 12 propiedades geométricas y 4 propiedades mecánicas, dando así a entender que las propiedades geométricas son los radios de curvatura R_1, R_2, R_3, R_4 ; capacidades de desplazamiento d_1, d_2, d_3, d_4 , y alturas h_1, h_2, h_3, h_4 ” (p. 19).

El radio efectivo para cada espacio del aislador es:

$$R_{efi} = R_i - h_i \quad (\text{para } i=1,2,3 \text{ y } 4) \quad (05)$$

Fuente: Fenz y Constantinou (2008). *Development, Implementation and Verification of Dynamic Analysis Models for Multi-Spherical Sliding Bearings*.

Para Fenz y Constantinou (2008) dan a entender que:

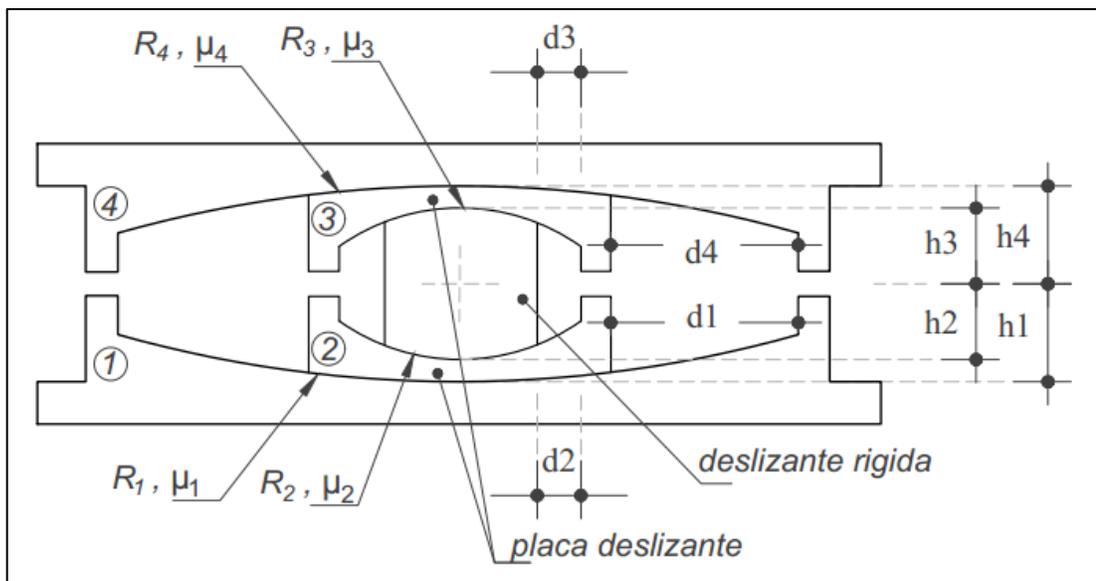
Las alturas (h_i , para $i=1,2,3$ y 4) al punto pivote no son constantes para los aisladores de triple péndulo, esto debido a la variación de la ubicación del punto pivote, sin embargo, se puede asumir que la ubicación del punto pivote permanece fijo y ubicado en el centro del ensamblado articulado formado por la placa 2, el deslizador rígido y la placa 3, o directamente ubicado en la parte central del deslizador rígido, DR, DS y DC corresponden

a los diámetros, del deslizador rígido, de las placas internas y de las placas externas, respectivamente. (p. 27)

Por otra parte, Fadi (2010) indica que:

Todas estas dimensiones y coeficientes de roce son compensados por el proyectista estructural a la empresa que fabrica los aisladores quien tiene la obligación de ensayarlos y entregar la curva de histéresis para que el proyectista verifique que corresponde al modelo con el cual realizó el cálculo estructural. (p. 24)

Figura 15. Partes principales del aislador FPT



Fuente. Fenz y Constantinou (2007). *Mechanical Behavior of Multi-Spherical Sliding Bearings*. Consultado el 3 de mayo de 2021. Recuperado de <http://mceer.buffalo.edu/publications/catalog/reports/Mechanical-Behavior-of-Multi-Spherical-Sliding-Bearings-MCEER-08-0007.html>

Según Puchaicela (2018) indica que:

Se sabe que el comportamiento del aislador FPT depende del valor que tome cada una de las 16 propiedades descritas anteriormente, sin embargo, para diseños en ingeniería, se asumen configuraciones estándar (al igual que para el aislador DFP), los cuales simplifican la cantidad de propiedades. (p. 30)

Según cita Fenz y Constantinou (2008) “una configuración estándar, normalmente usada para aplicaciones en ingeniería, tiene las siguientes características” (p. 27):

En donde:

$$\text{Ref2}=\text{Ref3}\ll\text{Ref1}=\text{Ref4} \quad (06)$$

Fuente: Fenz y Constantinou (2008). *Development, Implementation and Verification of Dynamic Analysis Models for Multi-Spherical Sliding Bearings*.

$$\mu_2=\mu_3<\mu_1<\mu_4 \quad (07)$$

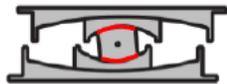
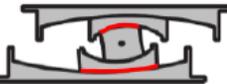
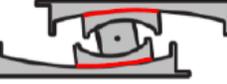
Fuente: Fenz y Constantinou (2008). *Development, Implementation and Verification of Dynamic Analysis Models for Multi-Spherical Sliding Bearings*.

Según el informe de Puchaicela (2018) que determinó:

Los estudios que el movimiento del aislador FPT estándar se divide en 5 fases, en donde cada fase es el resultado del deslizamiento en diferentes superficies cóncavas dado en el ejemplo, que, en la primera fase de movimiento, el deslizamiento se da únicamente en las superficies

cóncavas 2 y 3, permaneciendo con movimiento nulo en las superficies 1 y 4. (p. 28)

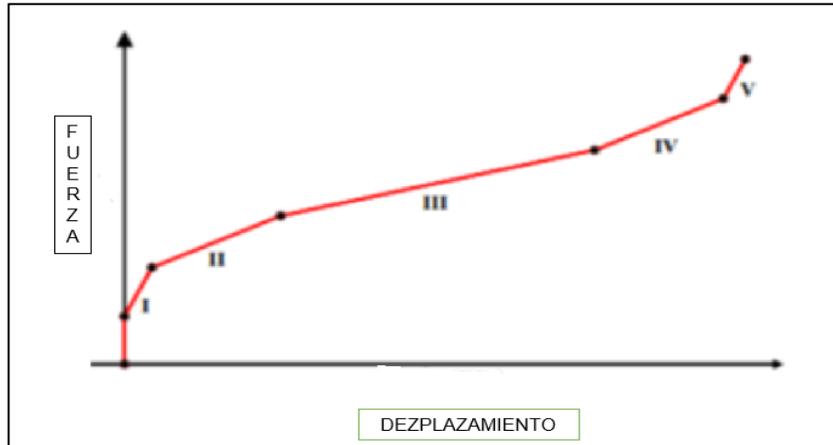
Figura 16. **Resumen de las superficies que se activan en cada fase de movimiento**

Gráfico	Fase	Superficies activadas	Rigidez
	I	Deslizamiento en las superficies 2 y 3	$\frac{W}{R_{ef2} + R_{ef3}}$
	II	Deslizamiento en las superficies 1 y 3	$\frac{W}{R_{ef1} + R_{ef3}}$
	III	Deslizamiento en las superficies 1 y 4	$\frac{W}{R_{ef1} + R_{ef4}}$
	IV	Deslizamiento en las superficies 2 y 4	$\frac{W}{R_{ef2} + R_{ef4}}$
	V	Deslizamiento en las superficies 2 y 3	$\frac{W}{R_{ef2} + R_{ef3}}$

Fuente: Zayas, Low y Mahin, (1990). *A Simple Pendulum Technique for Achieving Seismic Isolation*.

Así como lo indica el informe de Puchaicela (2018) que “esto es equivalente a decir que el periodo de vibración aumenta, no obstante, también se evidencian incrementos de rigidez en las fases IV y V, incrementos que ayuda reducir los desplazamientos en sismos severos” (p. 32).

Figura 17. **Relación fuerza-desplazamiento monotónica del aislador FPT**



Fuente: Sarlis y Constantinou (2013). *Model of Triple Friction Pendulum Bearing for General Geometric and Frictional Parameters and for Uplift Conditions.*

Las fases en que trabaja el aislador se utilizan las siguientes ecuaciones:

$$R_{ieff} = R_i - h_i \quad (08)$$

$$d_i^* = \frac{R_{ieff}}{R} d_i \quad (09)$$

$$F_{if} = \mu_i W \quad (10)$$

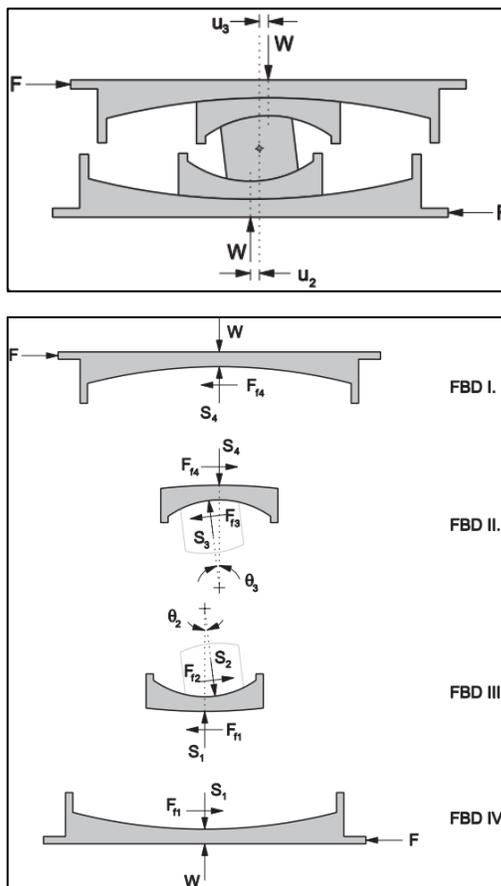
Fuente: Fadi (2010). *Evaluation of simplified methods of analysis for structures with triple friction pendulum isolators.*

Según afirman Fenz y Constantinou (2008) las fases de movimiento son:

1.3.4.1. Ciclo I del aislador

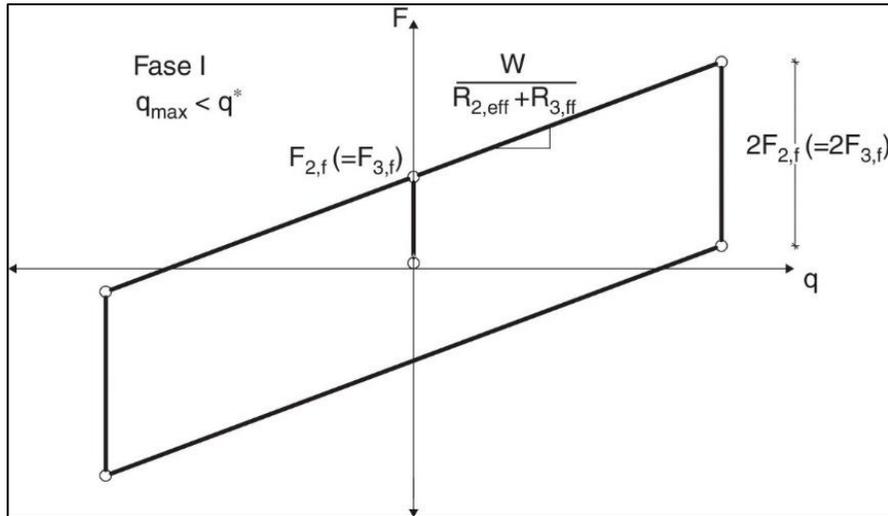
Para Puchaicela, (2018) “esta fase inicia cuando la fuerza sísmica, F , supera la fuerza de fricción, $Ff_2=Ff_3$, como la fricción en la superficie 2 es igual al de la superficie 3, entonces el deslizamiento ocurre simultáneamente en ambas superficies” (p. 33). En la figura 18 se observa el ciclo I del aislador Triple Péndulo de Fricción en posición deformada y diagrama de cuerpo libre.

Figura 18. Ciclo I del aislador triple péndulo de fricción



Fuente: Fenz y Constantinou (2008). *Development, Implementation and Verification of Dynamic Analysis Models for Multi-Spherical Sliding Bearings.*

Figura 19. **Curvatura de la histéresis de la fase I del aislador triple péndulo de fricción**



Fuente: Fenz y Constantinou (2008). *Development, Implementation and Verification of Dynamic Analysis Models for Multi-Spherical Sliding Bearings*.

La primera fase se genera por las siguientes ecuaciones:

$$0 \leq q \leq q^*$$

$$F = \frac{w}{R_{2,eff} + R_{3,eff}} q + \frac{F_{2,f} R_{2,eff} + F_{3,f} R_{3,eff}}{R_{2,eff} + R_{3,eff}}$$

$$q^* = (\mu_1 - \mu_2) R_{2,eff} + (\mu_1 - \mu_2) R_{3,eff} \quad (11)$$

Fuente: Fadi (2010). *Evaluation of simplified methods of analysis for structures with triple friction pendulum isolators*.

El deslizamiento comienza cuando el coeficiente de fricción más bajo, el de las superficies internas, es alcanzado, $F > \mu_1 W$. A continuación, el rodamiento se desliza sobre las dos superficies internas. La relación entre el desplazamiento u y el cortante V es

$$F = u \frac{W}{L_1 + L_2} + \frac{\mu L_1 + \mu L_2}{L_1 + L_2} W \quad (12)$$

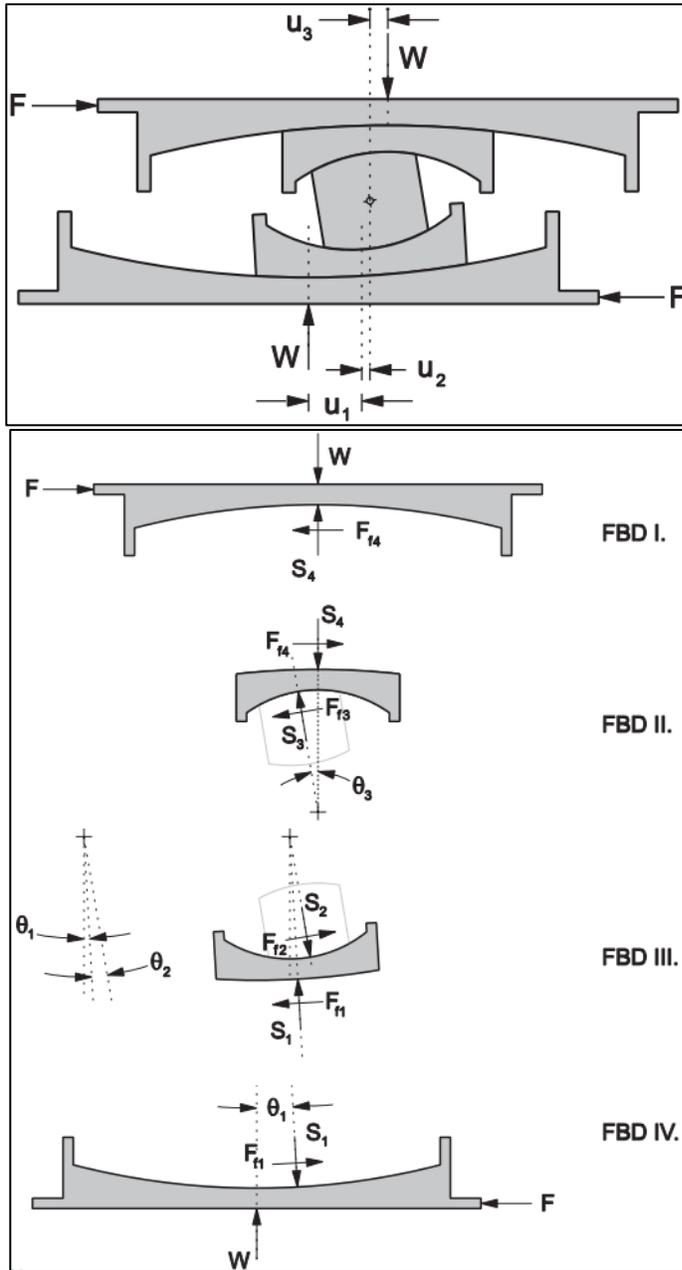
Fuente: Becker (2011). *Advanced Modeling of the Performance of Structures Supported on Triple Friction Pendulum Bearings*.

1.3.4.2. Ciclo II del aislador

Según Puchaicela (2018) “la fase II inicia una vez superado el límite de desplazamiento, u^* , (cuando $u \geq u^*$ equivalente a decir que $F \geq F f_1$), en ese motivo se da aquí se da la primera flexibilización o aumento del periodo” (p. 33).

Según Puchaicela (2018) el aislador trabaja así en esta fase “respecto al deslizamiento, ocurre lo siguiente, se activa el deslizamiento en la superficie 1, se detiene el deslizamiento en la superficie 2 y continúa el deslizamiento en la superficie 3” (p. 33).

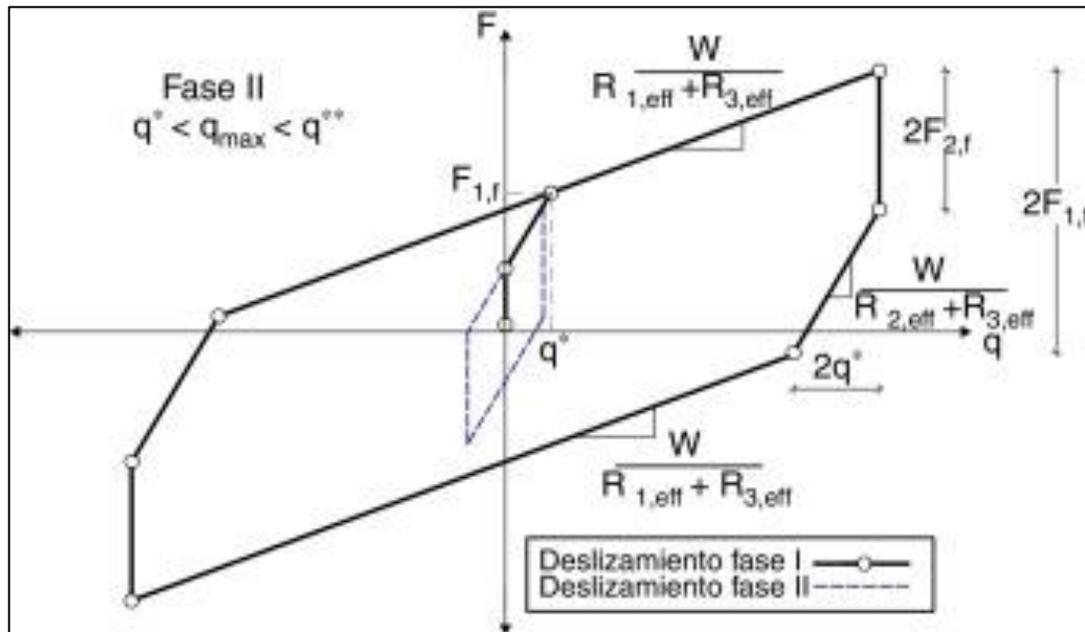
Figura 20. **Ciclo II del aislador Triple Péndulo de Fricción en posición deformada y diagrama de cuerpo libre**



Fuente: Fenz y Constantinou (2008). *Development, Implementation and Verification of Dynamic Analysis Models for Multi-Spherical Sliding Bearings.*

La curva de histéresis correspondiente a la fase II, se muestra en la figura 21.

Figura 21. Curva de histéresis de la fase II del aislador FPT



Fuente: Fenz y Constantinou (2008). *Development, Implementation and Verification of Dynamic Analysis Models for Multi-Spherical Sliding Bearings.*

La fuerza lateral F y desplazamiento lateral q , propuestas por (Fenz y Constantinou, 2007) son:

$$0 \leq q \leq q^{**}$$

$$F = \frac{w}{R_{1,eff} + R_{3,eff}} q + \frac{F_{2,f} R_{1,eff} + F_{3,f} R_{3,eff}}{R_{1,eff} + R_{3,eff}}$$

$$q^* = (\mu_1 - \mu_2)R_{1,eff} + (\mu_1 - \mu_2)R_{3,eff} \quad (13)$$

Fuente. Fenz y Constantinou (2007). *Mechanical Behavior of Multi-Spherical Sliding Bearing*. Consultado el 3 de mayo de 2021. Recueprado de <http://mceer.buffalo.edu/publications/catalog/reports/Mechanical-Behavior-of-Multi-Spherical-Sliding-Bearings-MCEER-08-0007.html>

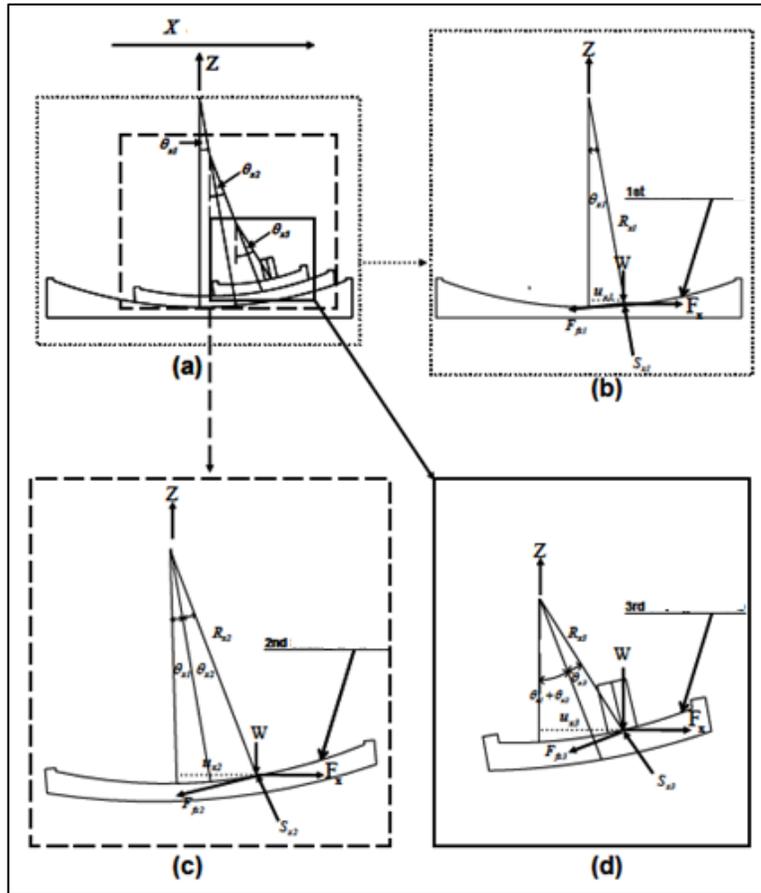
1.3.4.3. Ciclo III del aislador

Según cita Puchaicela (2018) “la fase III inicia cuando el desplazamiento, u , supera el valor límite, u^{**} (cuando $u \geq u^{**}$ equivalente a decir que $F \geq F_{f4}$)”. (p. 41).

En el informe de Fenz y Constantinou (2008) “continúa el deslizamiento en la superficie 1, continúa detenido el deslizamiento en la superficie 2, se detiene el deslizamiento en la en la superficie 3, se activa el deslizamiento en la superficie 4”. (p. 35).

En la figura 22 se puede observar las posiciones desplazadas: En el primer cuadro el diagrama de cuerpo libre del FPT durante el deslizamiento Etapa III en la dirección X el segundo cuadro (b) la ocurrencia de deslizamiento en el 1er deslizamiento interfaz, en el tercer cuadro (c) un desplazamiento constante en la 2ª interfaz deslizante, y el cuadro 4 (d) un desplazamiento constante en la 3ª interfaz deslizante.

Figura 22. Ciclo del movimiento III del aislador

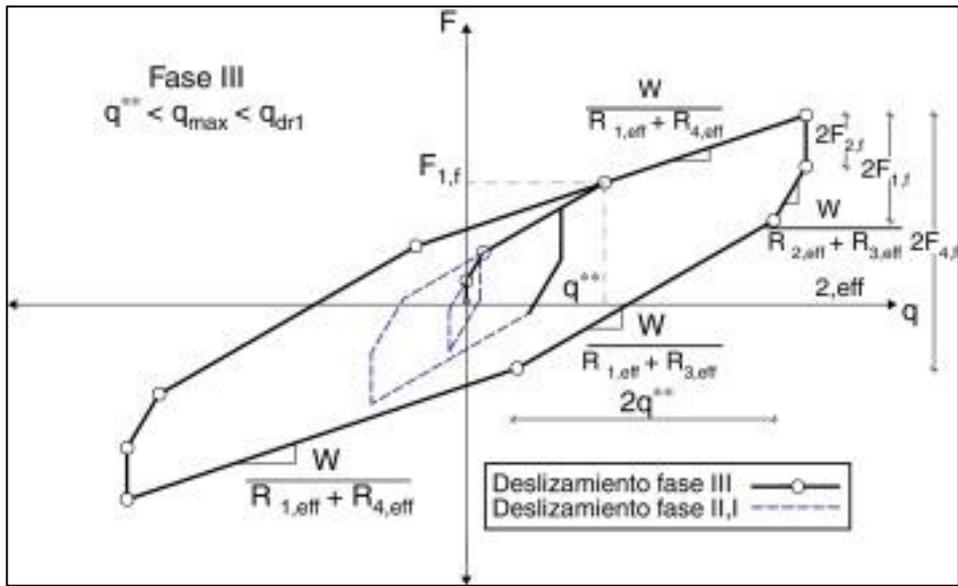


Fuente: Tsai y Yung (2009). *Mechanical Characteristics and Modeling of Multiple Trench Friction Pendulum System with Multi-intermediate Sliding Plates.*

La figura 23 se muestra lo que dicta el informe de Puchaicela (2018) que:

La curva de histéresis de la fase III, al momento de inversión del movimiento, la fuerza sísmica, F , se reduce en $2Ff_2$, luego continúa el deslizamiento en las superficies 2 y 3 y a continuación en las superficies 1 y 3. (p. 38)

Figura 23. Curva de histéresis de la fase III del aislador FPT



Fuente: Fenz y Constantinou (2008). *Development, Implementation and Verification of Dynamic Analysis Models for Multi-Spherical Sliding Bearings*.

Las ecuaciones que definen la fuerza y desplazamientos, que son:

$$q^{**} \leq q \leq q_{dr1}$$

$$F = \frac{W}{R_{1,eff} + R_{2,eff}} q + \frac{F_{1,f}(R_{1,eff} - R_{2,eff}) + F_{2,f}R_{2,eff} + F_{3,f}R_{3,eff} + F_{4,f}(R_{4,eff} - R_{3,eff})}{R_{1,eff} + R_{4,eff}}$$

$$q_{dr1} = q^{**} + d_1 \left(1 + \frac{R_{4,eff}}{R_{1,eff}} - (\mu_4 - \mu_1)(R_{1,eff} + R_{4,eff}) \right) \quad (14)$$

Fuente. Fenz y Constantinou (2007). *Mechanical Behavior of Multi-Spherical Sliding Bearing*. Consultado el 3 de mayo de 2021. Recueprado de <http://mceer.buffalo.edu/publications/catalog/reports/Mechanical-Behavior-of-Multi-Spherical-Sliding-Bearings-MCEER-08-0007.html>

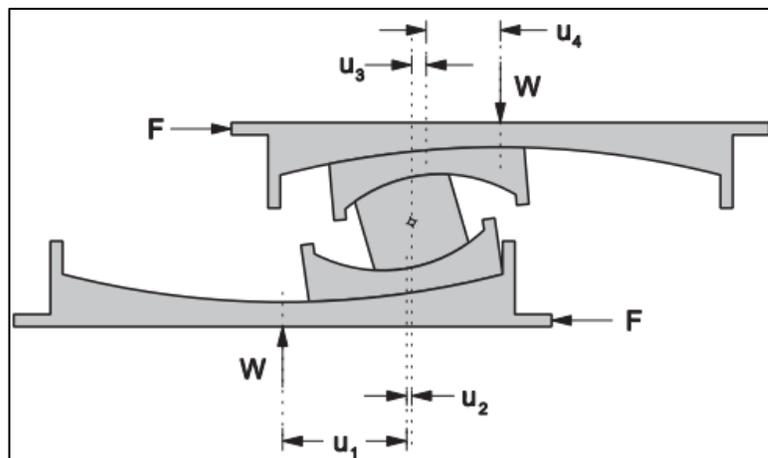
1.3.4.4. Ciclo IV del aislador

Según Puchaicela, (2018) “la fase IV inicia cuando el desplazamiento, u , supera el valor límite, u_{dr1} (cuando $u \geq u_{dr1}$ equivalente a decir que $F \geq F_{dr1}$), respecto al deslizamiento” (p. 41).

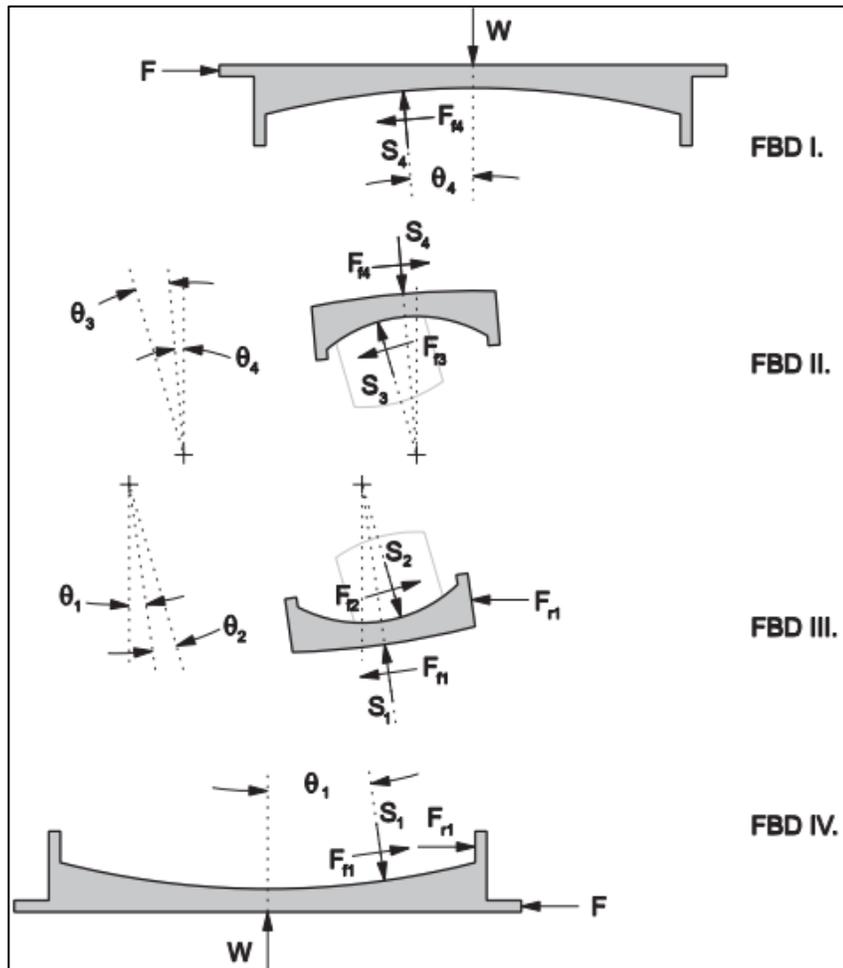
En esta fase ocurre lo siguiente como lo afirma Fenz y Constantinou (2008), “Se detiene el deslizamiento en la superficie 1 (choque de placa 2 con el anillo placa 1), se reactiva el deslizamiento en la superficie 2, continúa detenido el deslizamiento en la superficie 3, continúa el deslizamiento en la superficie 4” (p. 35).

La figura 24 se ve el modelo del aislador en la posición deformada en la fase IV, junto con su esquema de cuerpo libre.

Figura 24. **Ciclo IV del aislador Triple Péndulo de Fricción**



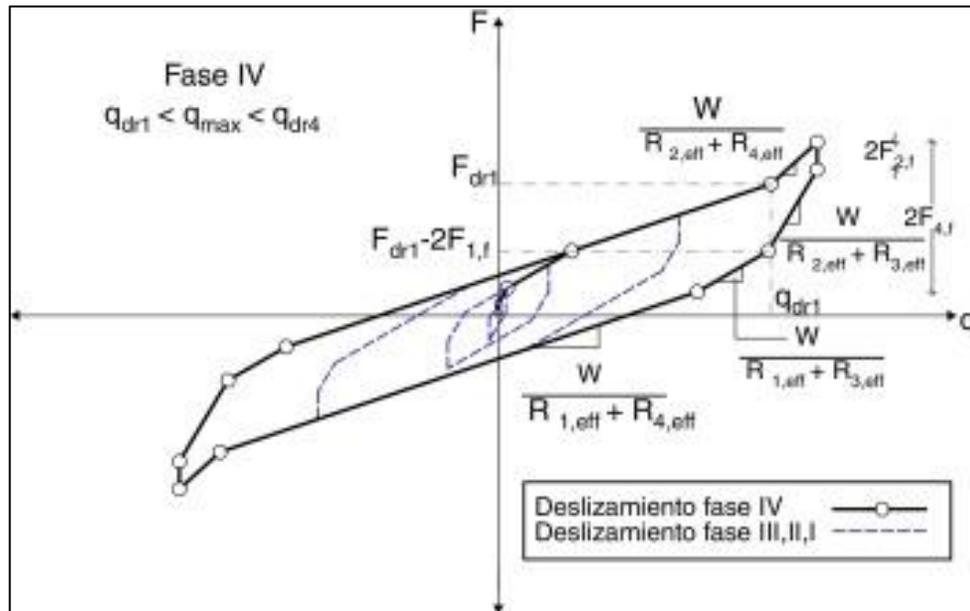
Continuación de la figura 24.



Fuente: Fenz y Constantinou (2008). *Development, Implementation and Verification of Dynamic Analysis Models for Multi-Spherical Sliding Bearings*.

La curva de histéresis de la fase IV se presenta en la figura 25.

Figura 25. Curva de histéresis de la fase IV del aislador FPT



Fuente: Fenz y Constantinou (2008). *Development, Implementation and Verification of Dynamic Analysis Models for Multi-Spherical Sliding Bearings.*

La fuerza y desplazamiento lateral vienen dadas por las siguientes ecuaciones:

$$q_{dr1} \leq q \leq q_{cap}$$

$$F = \frac{W}{R_{2,eff} + R_{4,eff}} (q - q_{dr1}) + \frac{W}{R_{1,eff}} d_1 + F_{1,f} \quad (15)$$

$$q_{cap} = 2d_1 + 2d_2$$

Fuente: Fadi (2010). *Evaluation of simplified methods of analysis for structures with triple friction pendulum isolators.*

En esta fase se puede considerar que el aislador está viable en un movimiento severo.

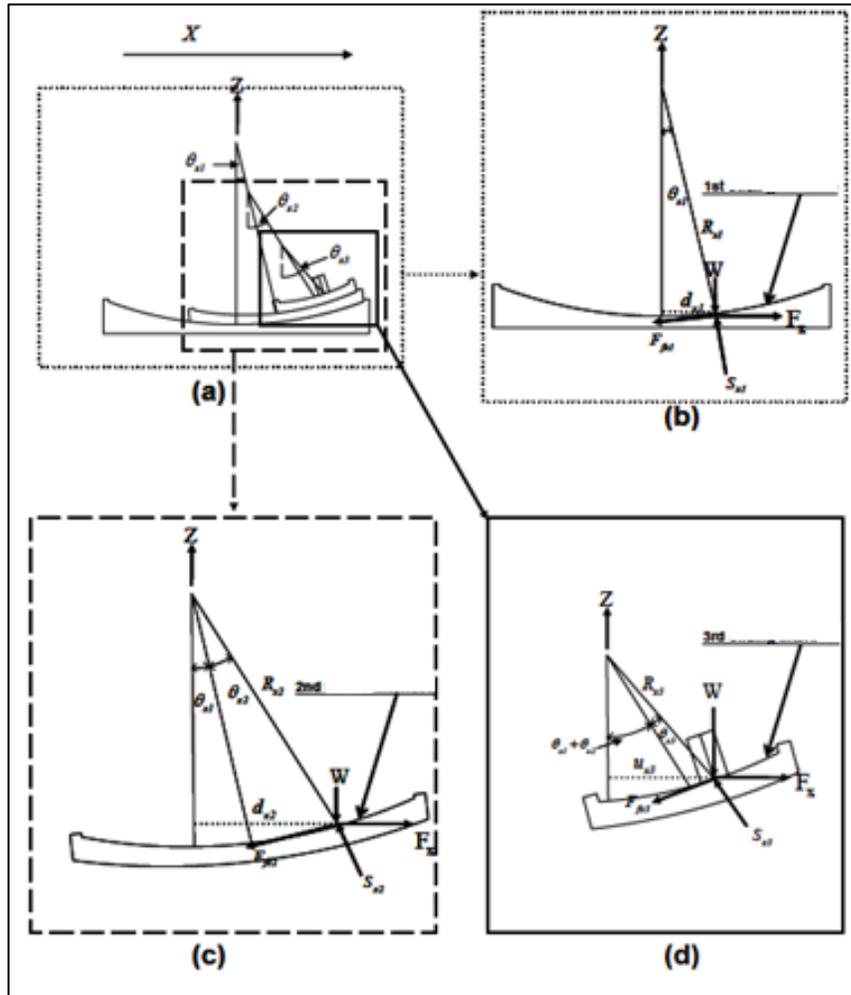
1.3.4.5. Ciclo V del aislador

Según Puchaicela, (2018) “la fase V inicia cuando el desplazamiento, u , supera el valor límite, u_{dr4} (cuando $u \geq u_{dr4}$ equivalente a decir que $F \geq F_{dr4}$)”. (p. 42).

Según afirma Fenz y Constantinou (2008) “Se detiene el deslizamiento en la superficie 1, se reactiva el deslizamiento en la superficie 2, se reactiva el deslizamiento en la superficie 3, se detiene el deslizamiento en la superficie 4”. (p. 36).

En la figura 26 se puede observar las posiciones desplazadas: (a) diagrama de cuerpo libre del FPT durante la etapa de deslizamiento V en dirección X, (b) contactando el desplazamiento inmovilizador en la 1ra interfaz deslizante, (c) contactando el limitador de desplazamiento en la 2da interfaz deslizante y (d) ocurrencia de deslizamiento en el 3er deslizamiento interfaz.

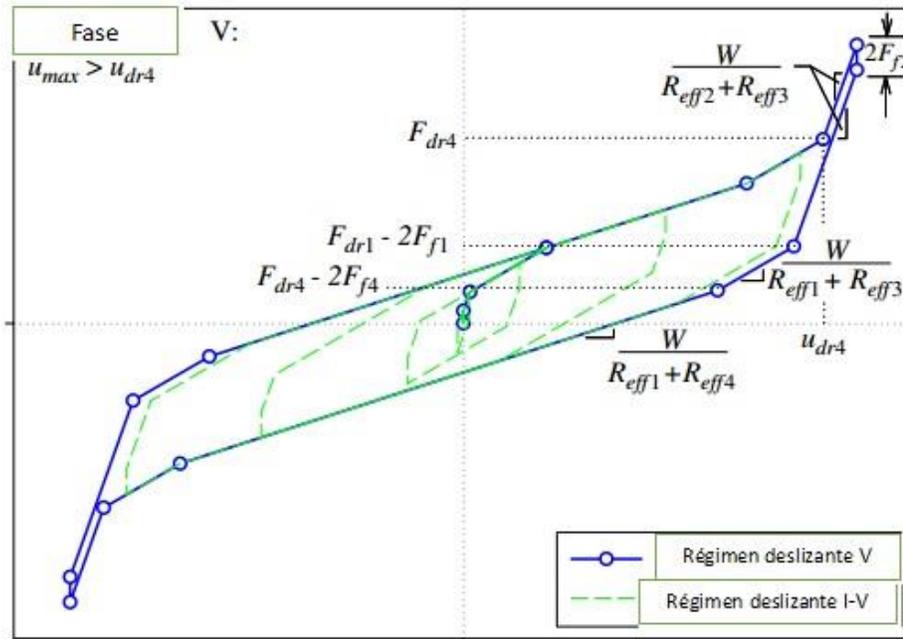
Figura 26. Fase del movimiento V del aislador



Fuente: Tsai y Yung (2009). *Mechanical Characteristics and Modeling of Multiple Trench Friction Pendulum System with Multi-intermediate Sliding Plates.*

La curva de histéresis de la fase IV del aislador FPT se presenta en la figura 27.

Figura 27. Curva de histéresis de la fase IV del aislador FPT



Fuente: Fenz y Constantinou (2008). *Development, Implementation and Verification of Dynamic Analysis Models for Multi-Spherical Sliding Bearings*.

Según cita Fenz y Constantinou (2007) “la fase V se está relacionada con el impacto del aislador interior con los topes, y que se dibuja con líneas entrecortadas para indicar su existencia; sin embargo, esta fase no se debe considerar en un diseño estructural” (p. 36).

Según Tsai y Yung (2009):

Del mismo modo, siguiendo los mismos procedimientos que se va a ver en la investigación en la dirección X, pueden obtenerse formulaciones matemáticas en la dirección Y. Esto significa que, al descuidar las fuerzas de fricción de las paredes de las placas deslizantes intermedias, el FPT propuesto el aislador con múltiples placas deslizantes intermedias se

moverá independientemente en dos direcciones ortogonales. En consecuencia, el período natural y efecto de amortiguación del aislador en cada dirección cambiará en varias etapas durante los terremotos. (p. 10)

Según cita Tsai y Yung (2009) “las características del aislador sísmico triple péndulo de fricción son generalmente funciones de radios y coeficientes de fricción de la superficie cóncava de la zanja y placas deslizantes intermedias en cada dirección” (p. 10).

Según afirma Tsai y Yung (2009) “este nuevo sistema proporciona una gran flexibilidad de servicio diferentes requisitos de diseño para ingenieros, el aislador que se mueve independientemente en dos direcciones ortogonales puede proporcionar diferentes períodos naturales, capacidades de desplazamiento y efectos de amortiguación en cada dirección” (p. 12).

Según cita Tsai y Yung (2009) “el período natural y efecto amortiguador del aislador FPT con múltiples placas de deslizamiento intermedias pueden cambiar continuamente durante temblores, esto podría evitar la posibilidad de resonancia inducida por los movimientos del suelo” (p. 12).

De esta manera el aislador de triple péndulo muestra una reducción significativa en la aceleración máxima del piso y la desviación máxima entre pisos de la superestructura en comparación con un edificio aislado con aislador péndulo de fricción simple. De hecho, el aislador triple péndulo actúa como un sistema de aislamiento adaptativo, ya que la rigidez y la amortiguación varían en proporción al nivel de movimiento del suelo de entrada y pueden controlar la aceleración máxima del piso y la deriva entre pisos juntos (Malekzadeh, Movahednejad y Mohammadi, 2009).

2. FILOSOFÍA DE DISEÑO DE AISLADORES FPT

2.1. Control estructural

Cualquier estructura, ya sea un edificio residencial normal, un rascacielos o una obra estratégica como un puente o un hospital, está sometida, además de las fuerzas estáticas habituales y ampliamente conocidas, a tensiones dinámicas que implican vibraciones en la propia estructura.

Las cargas dinámicas en cuestión pueden ser de diferente naturaleza e intensidad, pero sin duda la más temible y ciertamente la más peligrosa es la carga sísmica.

Los eventos sísmicos a lo largo de la historia han causado pérdidas humanas y daños muy graves en términos de devastación y destrucción del paisaje arquitectónico. Refiriéndonos únicamente al panorama guatemalteco, se citan los recientes terremotos de 1976 y del 2012.

Hoy en día, el hombre conoce las causas de los terremotos, pero aún no ha aprendido a predecir con certeza dónde y cuándo ocurrirá el evento sísmico, pero, a pesar de estos importantes pasos hacia adelante, los terremotos siguen siendo fuentes importantes de riesgo.

En el siglo XX, por lo tanto, para satisfacer las nuevas necesidades de los edificios cada vez más complejos, presentes no solo en la escena guatemalteca, la ingeniería sismo-resistente se ha desarrollado y establecido. La dirección hacia

la que se ha movido esta disciplina hasta ahora ha sido la de un enfoque de tipo diseño basado en la fuerza.

El diseño basado en la resistencia centra la atención en la seguridad, lo que significa lo mismo que la prevención del colapso estructural. Cada elemento estructural está diseñado para tener una resistencia superior a la requerida durante la aplicación de las cargas máximas estimadas, incluidas las dinámicas.

Como no es posible diseñar estructuras que permanezcan en el rango elástico incluso bajo las cargas dinámicas más violentas tanto por los límites de los materiales actualmente en el mercado, como por problemas relacionados con la rentabilidad de la intervención única el concepto de resistencia se ha combinado con el de ductilidad aceptando así que el edificio también puede funcionar en el campo del plástico.

Por lo tanto, la plastificación se utiliza como una técnica de protección sismo-resistente, de hecho, la reducción de la rigidez, resultante del campo plástico, se equilibra positivamente con la disipación de la energía sísmica entrante.

2.2. Características de una estructura con un aislador de base aislada

El modelo estructural del edificio con base aislada se puede mostrar con un modelo matemático idealizado del edificio con base aislada de número dado de pisos considerando que el edificio con base aislada se modela como una estructura de tipo cortante montada sobre sistemas de aislamiento con un grado de libertad lateral en cada piso. Se realizan las siguientes suposiciones para el sistema estructural en consideración:

- Se considera que la superestructura permanece dentro del límite elástico durante la excitación del terremoto. Esta es una suposición razonable ya que el aislamiento intenta reducir la respuesta al terremoto de tal manera que la estructura permanezca dentro del rango elástico.
- Los pisos se suponen rígidos en su propio plano y se supone que la masa está agrupada en cada nivel de piso.
- Las columnas son macizo proporcionando la rigidez lateral.
- El sistema está sujeto a un solo componente horizontal del movimiento del suelo del terremoto.
- Los efectos de la interacción suelo-estructura no se toman en consideración.

Las ecuaciones de movimiento se obtienen considerando el equilibrio de fuerzas en la ubicación de cada grado de libertad. Las ecuaciones de movimiento para la superestructura, bajo la aceleración del suelo del terremoto son expresado en forma de matriz como:

$$[Ms]\{X''s\} + [Cs]\{X's\} + [Ks]\{Xs\} = -[Ms]\{r\}(X''b + X''g) \quad (16)$$

Fuente: Oviedo y Duque (2006). *Sistema de control sísmica en edificaciones*.

Donde $[Ms]$, $[Cs]$ y $[Ks]$ son la masa, la amortiguación y matrices de rigidez de la superestructura, respectivamente, X'' y X' son los datos desconocidos de desplazamiento relativo del piso, velocidad y aceleración y vectores, $X''b$ y $X''g$ son la aceleración relativa de la masa base y la aceleración del suelo del terremoto y por último R es el vector de influencia de coeficientes.

La ecuación de movimiento correspondiente para la base se expresa la masa bajo la aceleración del suelo del terremoto por:

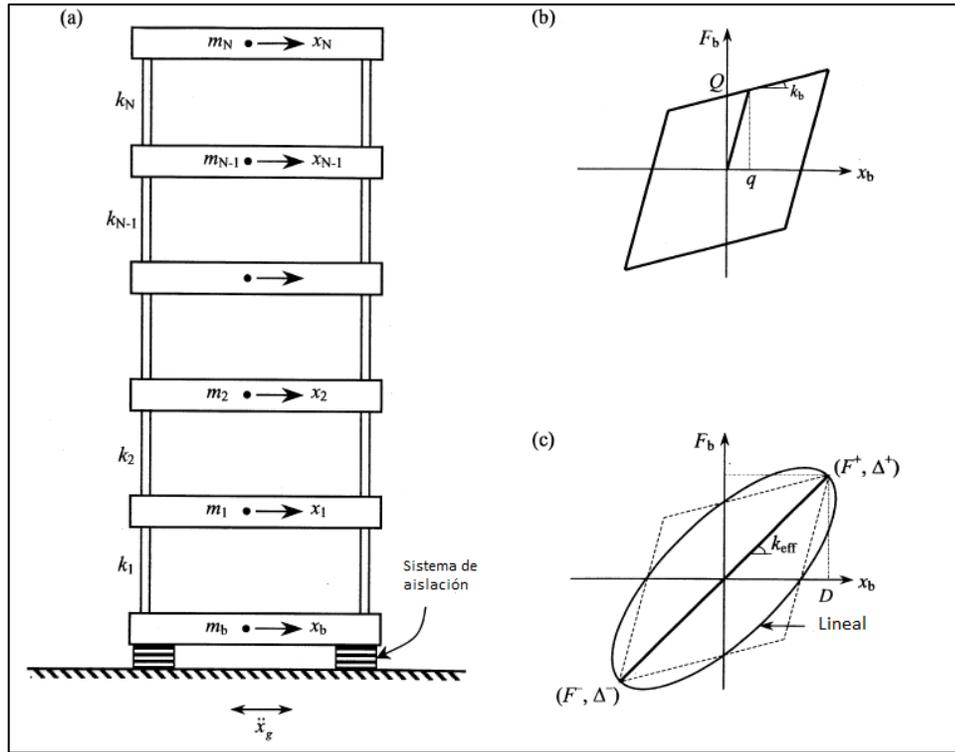
$$M_b \ddot{x}_b + F_b - k_1 x_1 - c_1 \dot{x}_1 = -M_b \ddot{x}_g \quad (17)$$

Fuente: Oviedo y Duque (2006). *Sistema de control sísmica en edificaciones*.

Donde M_b y F_b son la masa base y la fuerza de restauración desarrollado en el sistema de aislamiento, respectivamente, k_1 es la rigidez del piso del primer piso; y c_1 es la primera historia de amortiguación. La fuerza restauradora desarrollada en el aislamiento del sistema F_b depende mucho del tipo de sistema de aislamiento que se usará.

En la figura 28 se observa la imagen de un modelo de edificio con aislamiento en la base en donde el inciso (a) se observa el modelo matemático de la estructura de base aislada de 5 pisos, el inciso (b) el modelo histerético bi-lineal y el inciso (c) el modelo lineal equivalente del aislador.

Figura 28. Edificio aislado, modelo histerético, modelo lineal



Fuente: Oviedo y Duque (2006). *Sistema de control sísmica en edificaciones*.

El comportamiento fuerza-deformación del aislador se modela como: histerético no lineal representado por el modelo bilineal y el código elástico lineal equivalente especificado amortiguación viscosa modelo para los sistemas no lineales. Una comparación de la respuesta de la estructura aislada utilizando lo anterior dos modelos serán útiles para establecer la validez del código específico de un modelo lineal equivalente.

2.3. Modelo histerético bi-lineal de aisladores

El comportamiento fuerza-deformación no lineal del sistema de aislamiento se modela a través de la histéresis bilineal, se caracteriza por tres parámetros a saber: resistencia característica Q , rigidez post fluencia k_b y el desplazamiento de fluencia, q (indicado en el diagrama del modelo histerético de la figura 28).

El comportamiento bilineal se selecciona porque este modelo puede ser utilizado para todos los sistemas de aislamiento utilizados en la práctica, la resistencia característica Q está relacionada con el límite elástico del núcleo de plomo en los cojinetes elastoméricos y de fricción de los coeficiente de los sistemas de aislamiento de tipo deslizante, la rigidez post fluencia del sistema de aislamiento k_b es generalmente diseñado de tal manera para proporcionar el específico valor del período de aislamiento T_b expresado en esta ecuación

$$T_b = 2\pi \sqrt{\frac{M}{k_b}} \quad (18)$$

Fuente: Oviedo y Duque (2006). *Sistema de control sismica en edificaciones*.

Donde $M = (m_b + \sum_{j=1}^n m_j)$ es la masa total de la estructura de base aislada; y m_j es la masa del piso j de la superestructura. Por lo tanto, el modelo histerético bilineal del aislamiento de la base del sistema se puede caracterizar especificando tres parámetros, a saber, T_b , Q y q . La característica fuerza Q se normaliza por el peso del edificio $W = Mg$ (donde g es la aceleración gravitacional).

Idealmente, la mayor parte del desplazamiento lateral en una estructura aislada debería concentrarse en el sistema de aislamiento. La razón es que los

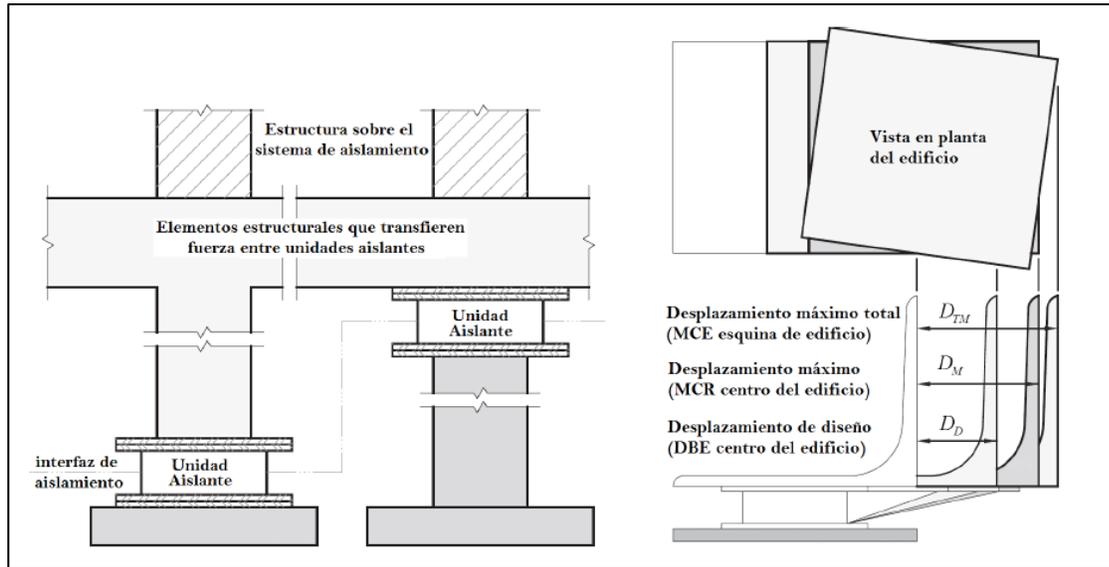
dispositivos aisladores son especialmente diseñados para incursionar en el rango inelástico disipar grandes cantidades de energía sin dañarse o perder resistencia.

2.4. Terminología del sistema de aislación

Conforme con la norma (ASCE 7-16) las consideraciones del diseño del aislador son:

- El grado primordial que resulta ser el primer grado de la composición aislada por arriba de la interfaz del aislamiento.
- La interfaz del aislamiento que es el límite entre la parte preeminente de la composición, que se aísla, y la parte inferior de la composición, que se mueve de manera dura con el suelo.
- El sistema de aislamiento que resulta ser la recolección de elementos estructurales que incluye cada una de las unidades de aislamiento individuales.
- La unidad del aislador que es una componente estructural horizontalmente flexible y verticalmente tesa del sistema de aislamiento que posibilita monumentales deformaciones laterales bajo carga sísmica de diseño.
- El desplazamiento máximo que son el movimiento más alto lateralmente, con la exclusión de movimiento adicional causada por la torsión real y accidental, solicitada para el diseño del sistema de aislamiento y además el desplazamiento máximo total que es el movimiento total mayor lateral, incluyendo el movimiento adicional causada por la torsión real y accidental, solicitado para verificación de la igualdad del sistema de aislamiento o recursos de los mismos, el diseño de las separaciones de la composición, y las pruebas de carga vertical de prototipos unidad del aislador. El *scragging* que es una degradación temporal de las características mecánicas de rigidez gracias a una carga cíclica o de trabajo.

Figura 29. Terminología del sistema de aislación y desplazamientos conforme con la norma (ASCE 7-16)



Fuente: Gamboa (2019). *Análisis Sísmico de Hospitales Considerando el Criterio de Funcionalidad Continua Empleando Aisladores de Base Friccional de Triple Péndulo en Zonas Sísmicas 3 y 4 del Perú.*

Aunque cada código establece sus propios objetivos de diseño, en general el desempeño especificado para edificios aislados es más exigente que el señalado para edificios convencionales. De acuerdo con las disposiciones recomendadas de FEMA 450 los edificios aislados deben:

- Resistir movimientos sísmicos menores y moderados sin daño a los elementos estructurales, elementos no estructurales, o a los contenidos del edificio.
- Resistir movimientos sísmicos mayores sin que el sistema de aislamiento colapse, sin daño significativo a los elementos estructurales y no estructurales, y sin mayor interrupción al funcionamiento del edificio.

En adición a esto los edificios aislados deberán resistir fuerzas de viento y gravitacionales sin la activación del sistema de aislamiento. Es decir, se debe evitar que, bajo efectos del viento, el sistema de aislamiento se desplace lateralmente puesto que esto podría resultar muy incómodo para los ocupantes del edificio y además estos desplazamientos pudieran no ser recuperables luego de que el viento haya cesado. Considerando que la mayoría de los códigos de diseño establecen que los edificios convencionales pueden alcanzar el estado límite de seguridad de vida bajo movimientos sísmicos mayores, el objetivo de desempeño planteado para edificios aislados es sin duda más exigente.

Para llegar al diseño final de aisladores FPT (con las 9 propiedades) en una construcción, se ofrece continuar el siguiente método:

- Establecer las metas de diseño: en este punto se estipulan los criterios para el diseño del sistema de aislación.
- Establecer la localización de aisladores: disposición en planta y en altura de los aisladores. Hacer un diseño preliminar: pre dimensionamiento de las características del aislador.
- Entrar en contacto con el fabricante: para que el fabricante provea de información de un aislador con semejantes o superiores propiedades que el definido en el diseño preliminar.
- Hacer la exploración sísmica de la composición con el aislador escogido: con la información del aislador que provee el fabricante, se hace el estudio sísmico del inmueble aislado.
- Verificación del aislador escogido: se verifica que todos los aisladores tengan: capacidad de movimiento, resistencia axial y resistencia a cortante, caso opuesto, se debería escoger otro aislador que cumpla con dichos requerimientos.

Al continuar el método dicho, se consigue que los aisladores FPT funcionen correctamente en la construcción, cumpliendo con los requisitos del ASCE 7-16 y adoptando las normas guatemaltecas de AGIES.

2.5. Configuración de las unidades de aislación

La decisión de la configuración en planta y en altura de los aisladores, están sujetas a las propiedades del plan en especial del lote en el que se encuentra el plan. Sin embargo, hay ciertos criterios que tienen la posibilidad de adoptar:

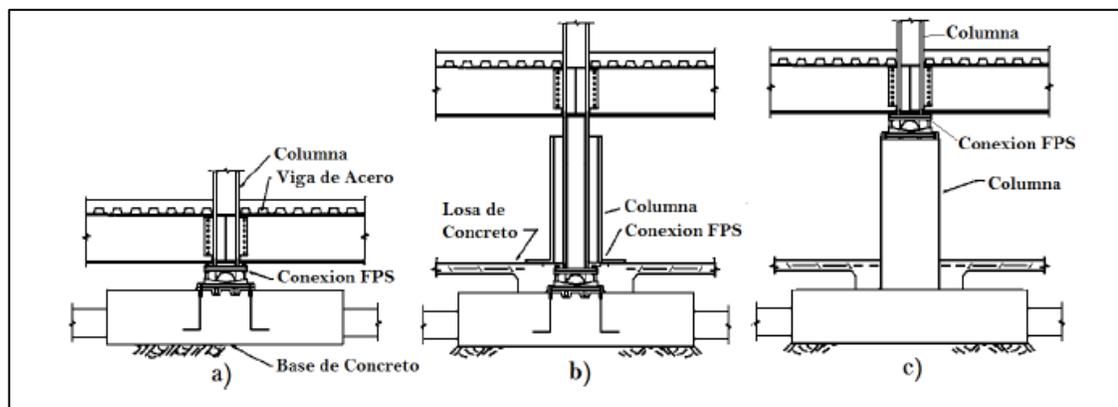
Sugerencias para la configuración en planta:

- Repartir los aisladores de tal forma que las cargas axiales que resistan sean semejantes para que todos requieran la misma capacidad axial.
- En construcciones con un sistema de pórticos, los aisladores, generalmente se localizan en cada columna.
- En construcciones con un sistema estructural dual o de muros estructurales, es viable que se necesite de 2 o más aisladores durante cada muro, no obstante, no es aconsejable optar por muros en un sistema estructural debido a que concentran esfuerzos en ciertos aisladores, dando sitio a optar la utilización de bastante más de un tipo de aislador. Lo ideal es intentar de repartir los aisladores, de tal forma que las cargas axiales que llegan en todos ellos sean semejantes, pudiendo tal cual que todos los aisladores requieran la misma capacidad axial.

Las sugerencias para la configuración en altura de la interfaz de aislación: Zayas, Low y Mahin (1990) muestran 3 configuraciones para la interfaz de aislación; de la figura la interfaz de aislación se sitúa en, a) entre la cimentación

y la losa del primer piso, b) en la parte inferior de la columna y c) en la parte preeminente de la columna, Adicionalmente a estas configuraciones tienen la posibilidad de utilizarse otras versiones dependiendo de lo cual se ocupe en el plan.

Figura 30. **Detalles de colocación del aislador**



Fuente: Zayas, Low y Mahin (1990). *A Simple Pendulum Technique for Acheiving Seismic Isolation.*

2.6. Características geométricas

Los valores de estas características permanecen definidos por:

2.6.1. Altura (hi)

Para asegurar el equilibrio del aislador, la interacción de aspecto del deslizador duro debería ser menor que 1.0, en otros términos:

$$\frac{h_2+h_3}{D_r} \leq 1.0 \quad (19)$$

Fuente: Zayas, Low y Mahin (1990). *A Simple Pendulum Technique for Achieving Seismic Isolation.*

Donde D_r es el diámetro del deslizador duro, el cual podría ser aproximado con la siguiente ecuación:

$$D_r = \sqrt{\frac{4Ar}{\pi}} \quad \text{donde} \quad Ar \geq \frac{P}{\sigma_{max}} \quad (20)$$

Fuente: Zayas, Low y Mahin (1990). *A Simple Pendulum Technique for Achieving Seismic Isolation.*

Donde P , es la fuerza axial máxima incluyendo efectos sísmicos; σ_{max} es el esfuerzo más alto.

El espesor en el interior de las placas 2 y 3, debería ser por lo menos 1 pulgada, además:

$$h_1 + h_4 \geq h_2 + h_3 + 2in \quad (21)$$

Fuente: Zayas, Low y Mahin (1990). *A Simple Pendulum Technique for Achieving Seismic Isolation.*

2.6.2. Radio de curvatura (Ri)

Los radios de curvatura tienen que llevar a cabo que:

$$R1 = R4 \gg R2 = R3 \quad (22)$$

Fuente: Constantinou, Kalpakidis, Filiatrault y Lay (2011). *LRFD Based Analysis and Design Procedures for Bridge Bearings and Seismic Isolators*.

R1=R4: dichos valores tienen que tomarse de la tabla 1, en lo que muestra un costo asociado del diámetro del área cóncava externa D_c que representa la función de movimiento del aislador y se examina en el paso D.

R2=R3: se sugiere adoptar radios efectivos presentados en el manual de *Structural Engineers Association of California* (SEAOC, 2014) dichos son: 5.5, 12, 23, y 33 pulgadas dichos valores nos brindan un extenso rango de maneras de diseño. Con en relación a los diámetros del área cóncava interna D_s se fabrican en el rango de 6 a 65 pulgadas conforme el informe de Constantinou, Kalpakidis, Filiatrault y Lay (2011).

Tabla II. **Dimensión estándar de las placas**

Id.	Radio de Curvatura (R1=R4)	Diámetro de las superficies cóncavas D_c (in)
1	61	14
2		28
3		22
4		31
5	88	36
6		27
7		31
8		33
9		36
10		39
11		41
12		4
13		46
14		51
15		56

Continuación de la tabla II.

Id.	Radio de Curvatura (R1=R4)	Diámetro de las superficies cóncavas Dc (in)
16	120	27
17		56
18	156	63
19		70
20		106
21		124
22	238	78
23		94
24		106
25		131
26		143

Fuente: Constantinou, Kalpakidis, Filiatrault y Lay (2011). *LRFD Based Analysis and Design Procedures for Bridge Bearings and Seismic Isolators*.

2.6.3. Coeficientes de Fricción μ

La fricción natural disipa la energía cinética del sistema como energía térmica. Lógicamente, los materiales de fricción generarán porciones importantes de calor, lo cual paralelamente puede conducir a cambios en la fricción y desgaste desmesurado.

El coeficiente de fricción nominal se define como el rango de valores del coeficiente para temperatura usual y sin efectos por envejecimiento, contaminación e historial de carga, o sea, para un aislador nuevo a temperatura común.

Los valores nominales del coeficiente de fricción están sujetas a la presión promedio de las unidades de aislación (carga axial dividida por área de contacto

del control deslizante), la condición de la interfaz deslizante y la magnitud del control deslizante (Constantinou, Kalpakidis, Filiatrault y Lay, 2011).

Para los controles deslizantes con un diámetro entre 150 mm (6 pulgadas) y 1650 mm (65 pulgadas). Tomando en cuenta condiciones no lubricadas, se ofrece el siguiente rango de valores del coeficiente de fricción para su uso en el estudio:

A lo largo del primer periodo de sismo, μ_{1c} , se asume que $\mu_{1c} = 1.2 \mu_{3c}$, para μ_{3c} debería asignarse el más grande costo nominal dentro del rango de valores. μ_{3c} , es el costo definido como el coeficiente de fricción promedio a lo largo de los 3 primeros ciclos de terremoto, existe incertidumbre en los valores nominales por lo cual el ingeniero debería hacer varias suposiciones sobre el rango de valores.

Ejemplificando, datos experimentales de aisladores de gran tamaño (contacto de diámetro igual a 11 pulgadas o 279 mm) y probadas en amplitudes de 12 a 28 pulgadas (300 a 700 mm) fueron usado para arrimar los valores nominales del coeficiente de fricción μ_{3c} en el rango de presión P de 2 a 8 ksi (13.8 a 62MPa) con la ecuación

$$\mu_{3c} = 0.122 - 0.01P \quad (23)$$

Fuente: Constantinou, Kalpakidis, Filiatrault y Lay (2011). *LRFD Based Analysis and Design Procedures for Bridge Bearings and Seismic Isolators*.

Donde P está en unidades de ksi, citado en Constantinou, Kalpakidis, Filiatrault y Lay (2011). No obstante, para las áreas cóncavas externas $\mu_1 < \mu_4$: se puede utilizar rangos a partir de 3 a 10 %.

Dichos coeficientes de fricción son los que más influyen en la conducta universal de la composición (hablando en términos de desplazamientos y cortantes basales) debido a que, dichos son los delegados a disipar la energía frente a sismos de diseño según en el manual de *Structural Engineers Association of California* (SEAOC, 2014).

Para las áreas cóncavas internas $\mu_2 = \mu_3$ tienen la posibilidad de utilizar rangos a partir de 1 a 2%. Dichos coeficientes de fricción, al ser subjetivamente pequeños, no poseen gran predominación en la conducta universal de la composición, aun cuando se tornan bastante relevantes hablando en términos de aceleraciones de piso.

2.7. Propiedades superiores e inferiores de los aisladores FPT

Tienen que calcularse los valores límite inferiores *Lower Bound* de la resistencia característica de los aisladores FPT usando el costo nominal más bajo del coeficiente de fricción a lo largo de los primeros 3 ciclos (promedio de 3 ciclos) del terremoto.

Los valores límite superiores *upper bound* de la resistencia característica de los aisladores FPT tienen que calcularse usando el costo nominal del coeficiente de fricción a lo largo del primer periodo del terremoto y multiplicado por el componente de modificación de la propiedad del sistema para los efectos combinados del envejecimiento, la contaminación y la baja temperatura.

2.7.1. Capacidad de reintegración

La función de reintegración es controlada por el radio de curvatura y el coeficiente de fricción. Por definición la fuerza de reintegración es

$$F_{res} = 0.5K_b * D_m \quad (24)$$

Fuente: Zayas, Low y Mahin (1990). *A Simple Pendulum Technique for Achieving Seismic Isolation.*

$$F_{res} = \frac{W}{R_{eff}} * D_m \quad (25)$$

Fuente: Zayas, Low y Mahin (1990). *A Simple Pendulum Technique for Achieving Seismic Isolation.*

Donde F_{res} es la fuerza de reintegración, K_b es la rigidez post fluencia, que es igual a $W/R_{eff} * D_m$ que es el movimiento más alto.

La fuerza de reintegración es inversamente proporcional al radio de curvatura, sin embargo, la dependencia entre el coeficiente de fricción y la fuerza de reintegración está implícita en el movimiento DM , esto sabiendo que un crecimiento del coeficiente de fricción aumenta el amortiguamiento y debido a lo cual se disminuye el movimiento.

Esto quiere decir que, a más grande coeficiente de fricción, menor capacidad de reintegración.

Para comprender mejor este asunto se muestran las curvas de histéresis de la figura 32 en los cuales se ha variado el tiempo (T) y el coeficiente de fricción (μ).

La alteración del tiempo se sobreentenderá como la alteración del radio de curvatura debido a que se enseñó que $T=2\pi\sqrt{(R_{eff}/g)}$ y por consiguiente si crece el radio además crece el tiempo. Cabe resaltar que las curvas de histéresis de la

figura pertenecen a de un aislador de fácil péndulo, empero en definición es lo mismo para un aislador de triple péndulo.

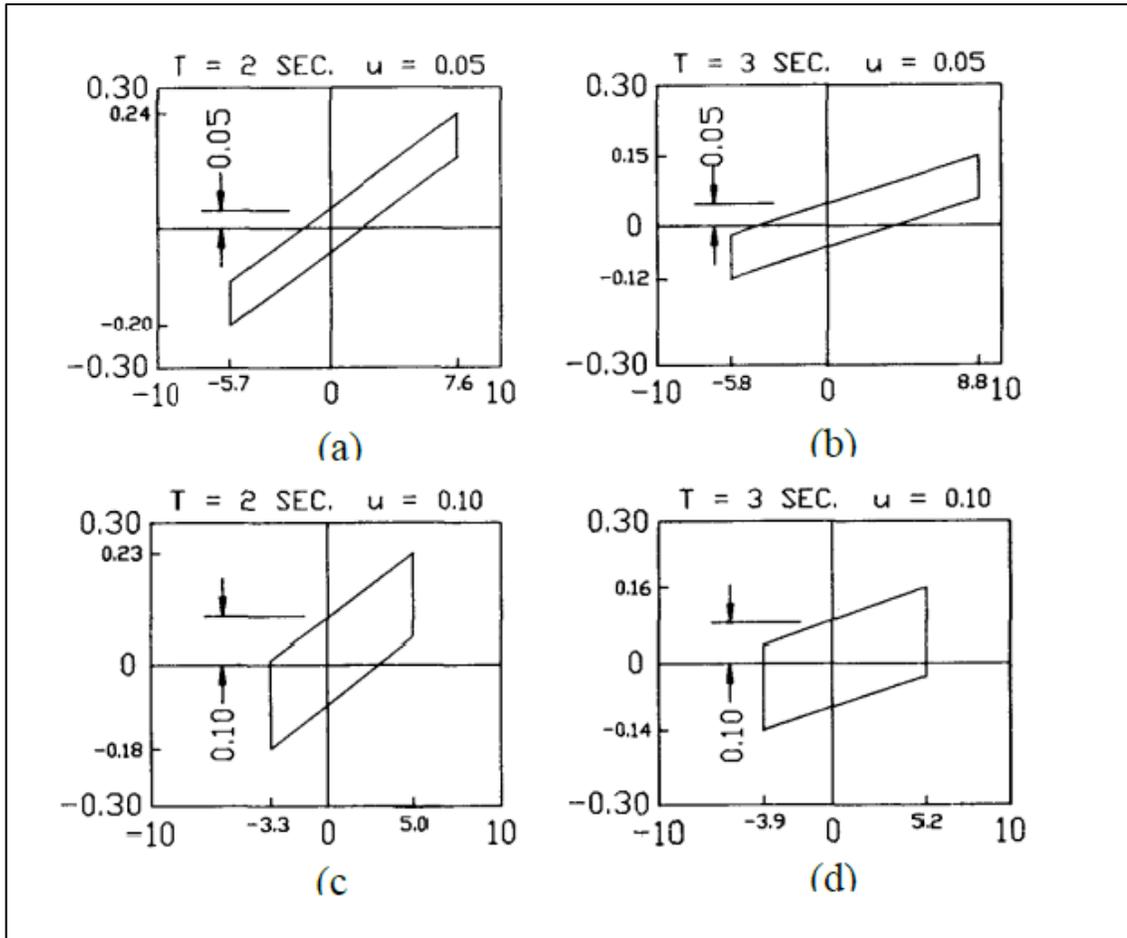
Como se observa entre la Figura a y la Figura b aumenta el tiempo de 2 a 3 seg, manteniendo el coeficiente de fricción constante e igual a 0.05. Implementando la ecuación anterior se tiene que $F_{res} (T=2\text{seg}) = 0.097$ y $F_{res} (T=3\text{seg}) = 0.050$, con lo cual se comprueba que verdaderamente al aumentar el lapso (radio de curvatura) se disminuye la función de reintegración.

Ahora si comparamos la Figura b y la Figura d vemos que se conserva un tiempo de 3.0 seg, empero aumenta el coeficiente de fricción de 0.05 a 0.10. con lo que se disminuye el movimiento de 8.8 a 5.2 pulgadas.

Calculando la fuerza de reintegración, se tiene $F_{res} (Dm=8.8) = 0.050$ y $F_{res} (Dm=5.2) = 0.030$, con lo cual se comprueba que, al aumentar el coeficiente de fricción, además se disminuye la fuerza de reintegración.

De lo anterior se tiene que la curva de histéresis de la Figura d tiene la menor fuerza de reintegración, esto como resultado de que se ha aumentado al mismo tiempo el lapso y el coeficiente de fricción, por consiguiente, se concluye que no es aconsejable combinar radios de curvatura y coeficientes de fricción enormes. Sin embargo, si se puede combinar radios de curvatura gigantes con coeficientes de fricción pequeños o radios de curvatura pequeños con coeficientes de fricción monumentales.

Figura 31. **Implicación del periodo y coeficiente de fricción en el comportamiento de aisladores FPS**



Fuente: Zayas, Low y Mahin (1990). *A Simple Pendulum Technique for Achieving Seismic Isolation.*

2.7.2. Capacidad de movimiento

Constantemente inicialmente del diseño de un aislador FPT debería tener: alturas $h_2 = h_3 < h_1 = h_4$; radios de curvatura $R_2 = R_3 < R_1 = R_4$ y coeficientes

de fricción $\mu_2 = \mu_3 < \mu_1 \mu_4$ que responde con un movimiento D_m y cortante basal V_m .

Con esta información se proviene a decidir las habilidades de movimiento $d_2 = d_3 < d_1 = d_4$ que necesita el aislador para organizar el movimiento D_m . La función de movimiento de las placas internas $d_2 = d_3$ está formado así:

$$d_2 > (\mu_1 - \mu_2)Ref_2 \quad (26)$$

Fuente: Puchaicela (2018). *Diseño y análisis de edificaciones con aisladores de base tipo FPT*.

$$d_3 > (\mu_4 - \mu_3)Ref_3 \quad (27)$$

Fuente: Puchaicela (2018). *Diseño y análisis de edificaciones con aisladores de base tipo FPT*.

Estas desigualdades son requeridas para poder hacer las 5 etapas de desplazamiento en el aislador de triple péndulo que se explicó antes en las etapas de desplazamiento.

La norma ASCE7-16, necesita que un aislador se diseñe para tener una capacidad de movimiento de por lo menos DTM (desplazamiento total máximo). Por consiguiente, $d_1 = d_4$ se calcula para tener una capacidad de movimiento DTM. (Puchaicela, 2018).

Conocemos que el aislador esta operable hasta la etapa IV, por lo cual el aislador FPT se diseña para que opere en la etapa III o IV. Por consiguiente, debería cumplirse que: Fase III, si $DTM \leq u_{dr1}$ Fase IV, si $DTM \leq u_{dr4}$.

$d1 = d4$ se calcula de la siguiente forma en la etapa III, siendo análoga su cálculo en la etapa IV. Despejando $d1$ de la desigualdad en la etapa III:

$$d1 \geq \left[\frac{DTM - 2(\mu1 - \mu2)Reff2 + (\mu4 - \mu1)(Reff1 - Reff2)}{2} \right] * \frac{R1}{Reff1} \quad (28)$$

Fuente: Puchaicela (2018). *Diseño y análisis de edificaciones con aisladores de base tipo FPT.*

La ecuación simplificada se da una vez que se asume que solamente las placas 1 y 4 proveen la función de movimiento DTM:

$$d1 \geq \left(\frac{DTM}{2} \right) \frac{R1}{Reff1} \quad (29)$$

Fuente: Puchaicela (2018). *Diseño y análisis de edificaciones con aisladores de base tipo FPT.*

Con esta ecuación, si $\mu4 \approx \mu4$, entonces el aislador opera en la etapa III, caso opuesto puede operar en la etapa III o IV. En ambas ecuaciones se puede ver que el concepto de la derecha está multiplicado por un elemento $R1/Reff1$, esto se hace para tener en cuenta la reducción de la capacidad de movimiento por la rotación de las placas.

2.8. Contacto con el fabricante del aislador FPT

Después de hacer el diseño preliminar, se necesita entrar en contacto con el fabricante de aisladores FPT con el objetivo de revisar la disponibilidad de un aislador con las propiedades del diseño preliminar, en especial de radios de curvatura (equivalente al periodo) y coeficientes de fricción (equivalente al amortiguamiento).

En la situación que no contar con un aislador con equivalentes propiedades, es posible que el fabricante proporcione información de un aislador con semejantes propiedades o recomendara utilizar un aislador con superiores propiedades al diseñado. Este método debería ser llevado a cabo obligatoriamente, ya que después de este punto, se debería hacer la exploración sísmico de la composición 3D.

La compañía *Earthquake Protection System* (EPS) es la exclusiva organización que fabrica los aisladores de triple péndulo de fricción, esto ya que EPS tiene patentado este producto.

2.9. Ubicación de aisladores

La selección de la localización en planta y en altura (interfaz de aislación) de los aisladores, es distinto en cada proyecto de construcción. No obstante, hay ciertos criterios en general que tienen la posibilidad de ser aplicados en todos los casos, estos son:

2.9.1. Colocación de aisladores en la planta

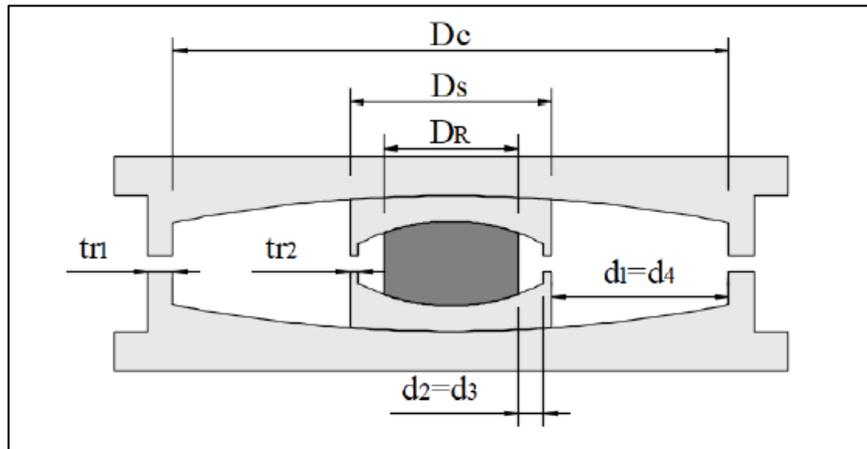
Lo ideal es intentar de repartir los aisladores, de tal forma que las cargas axiales que llegan en todos ellos sean semejantes, pudiendo tal que todos los aisladores requieran la misma capacidad axial. Las construcciones con un sistema de pórticos (sin muros estructurales), generalmente, los aisladores se colocan en cada columna. Sin embargo, si la construcción tiene muros estructurales, es viable que se requiera uno, 2 o más aisladores colocados durante cada muro, dependiendo de su longitud.

En construcciones con un sistema de pórticos (sin muros estructurales), en la mayoría de los casos, los aisladores se colocan en cada columna. Sin embargo, si la construcción tiene muros estructurales, es viable que se ocupe uno, 2 o más aisladores colocados durante cada muro, dependiendo de su longitud. Sin embargo, no es aconsejable que una construcción proyectada con aislación sísmica tenga muros en su sistema estructural, debido a que las paredes ocasionan la concentración de esfuerzos en determinados aisladores, dando sitio a que se necesite utilizar bastante más de un tipo de aislador.

2.9.2. Dimensión en planta

Con el objetivo de tener una iniciativa del tamaño que va tener el aislador se calcula D_s y D_c .

Figura 32. Nomenclatura de un aislador FPT



Fuente: Puchaicela (2018). *Diseño y análisis de edificaciones con aisladores de base tipo FPT*.

Para obtener el diámetro de las placas internas (D_s) de la figura se tiene esta fórmula:

$$D_s = D_r + 2t_{r2} + d_2 + d_3 \quad (30)$$

Fuente: Puchaicela (2018). *Diseño y análisis de edificaciones con aisladores de base tipo FPT*.

Donde t_{r2} es el espesor del anillo de retención de la placa 2 (igual al de la placa 3), del mismo modo el diámetro de zonas de las placas externas (D_c) se recibe de la fórmula:

$$D_c = D_s + d_1 + d_4 \quad (31)$$

Fuente: Puchaicela (2018). *Diseño y análisis de edificaciones con aisladores de base tipo FPT*.

2.9.3. Nomenclatura que identifica el aislador FPT

La nomenclatura que emplea *Earthquake Protection System* para detectar sus aisladores es la siguiente:

$$FPT \ R_o D_c / D_s - R_1 / D_r - H_r \quad (32)$$

Fuente: Constantinou, Aguilar, Morales y Caiza (2016). *Desempeño de aislador fpt8833/12-12/8-5 en el análisis sísmico del centro de investigaciones y de post grado de la UFA-ESPE*.

Donde: R_o :

Radio de curvatura de las áreas externas ($R_1 = R_4$)

- D_c : Diámetro de las zonas cóncavas externas.
- D_s : Diámetro del aislador interno.
- R_i : Radio de curvatura de las áreas internas ($R_2 = R_3$).
- D_r : Diámetro del deslizador duro.

- Hr: Elevación del deslizador duro $2h_2 = 2h_3$

Donde los datos fueron adoptados por Constantinou, Aguilar, Morales y Caiza (2016).

Ejemplificando, el aislador FPT 15663/22-20/16-8 que adopto se muestra, tiene la siguiente geometría:

$$R_o = 156''$$

$$D_c = 63''$$

$$D_s = 22''$$

$$R_i = 20''$$

$$D_r = 16''$$

$$H_r = 8''$$

Esto corresponde a:

$$R_1 = R_4 = 156''$$

$$R_2 = R_3 = 20''$$

$$h_1 = h_4 = \frac{12''}{2} = 6''$$

$$h_2 = h_3 = \frac{H_r}{2} = 4''$$

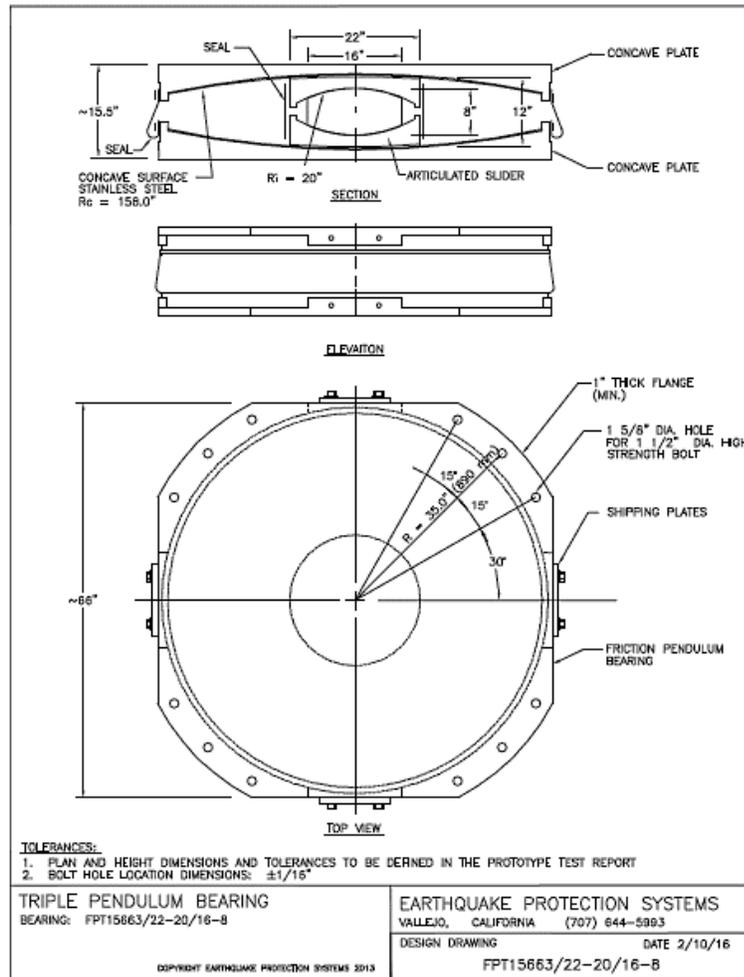
$$d_1 = d_4 = \frac{D_c - D_s}{2} = 20.5''$$

$$d_2 = d_3 = \frac{D_s - D_r - 2tr_2}{2} = 2.5'' \quad (33)$$

Fuente: Constantinou, Aguilar, Morales y Caiza (2016). *Desempeño de aislador fpt8833/12-12/8-5 en el análisis sísmico del centro de investigaciones y de post grado de la UFA-ESPE.*

Asumiendo $tr_2 = 0.5''$

Figura 33. Ejemplo de la nomenclatura de EPS – FPT 15663/22-20/16-8



Fuente: Zayas, Mahin y Constantinou (2016). *Safe and Unsafe Seismically Isolated Structures*.

3. ANÁLISIS SÍSMICO

3.1. Análisis de construcciones sin aisladores sísmicos

Para la exploración de construcciones hay una gran proporción de métodos, que tienen la posibilidad de estar basados en la conducta flexible lineal o en la conducta inelástico no lineal de los recursos estructurales de una construcción.

El primer tipo de procedimientos, los flexibles, definen estados de fuerzas laterales fijas o dinámicas y características flexibles de los materiales para decidir la interacción demanda-capacidad de los recursos estructurales, proporcionando una buena aproximación de la capacidad flexible y del inicio de la fase de fluencia; no obstante, no tienen la posibilidad de adivinar mecanismos de fallo ni tomar en cuenta la redistribución de fuerzas a lo largo del regreso de la fluencia.

En la situación de los procedimientos inelásticos, existe la probabilidad de acercarse a lo que realmente ocurre en la composición, identificando niveles de funcionamiento, modos de fallos y la conducta progresiva de la composición hasta el colapso.

3.2. Ductilidad

Es la propiedad de la materia que posibilita su deformación sin conseguir el rompimiento o el colapso.

En la situación de construcciones, se emplea como un mecanismo de aislación para disipar energía, permitiendo cambiar la energía cinética de ingreso

gracias a un movimiento sísmico mediante la deformación de los recursos estructurales, para evadir el colapso de una construcción una vez que se excede la capacidad precitada de carga lateral o gravitacional.

En las consideraciones de diseño convencionales, se disminuyen las cargas sísmicas de acuerdo con la ductilidad de una composición. Esto posibilita, que, aun cuando las cargas laterales reales excedan las cargas utilizadas en el diseño, la ductilidad proporcione el mecanismo último de disipación de energía, no obstante, esto puede crear males significativos en los recursos, o inclusive irreparables.

3.2.1. Espectro de respuesta

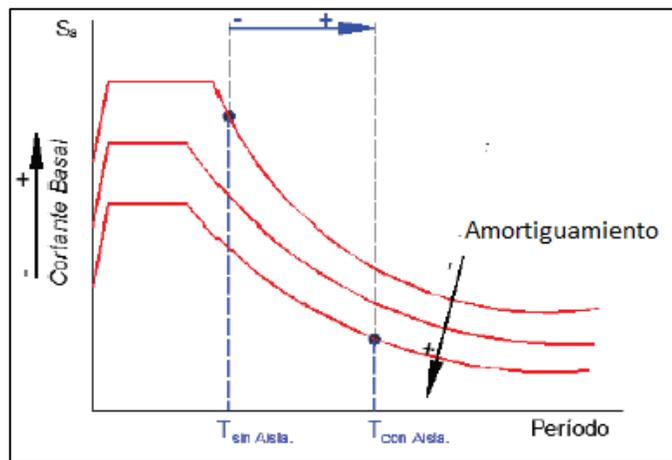
Es un valor usado que mide la actitud de una composición frente a la vibración del suelo que la soporta. El espectro es dependiente de 2 componentes: la aceleración de la vibración a la que se somete la base y del tiempo de oscilación de la composición, aun cuando la vibración de la base y la composición sean diferentes permanecen ligadas a una con la otra.

Un espectro de respuesta sísmica constituye un instrumento eficiente para la evaluación de las fuerzas laterales máximas inducidas en construcciones sometidas a una excitación sísmica.

Los 3 espectros dan porciones físicas significativas; el espectro de deformación provee la deformación pico del sistema; el espectro de pseudo rapidez está referente de manera directa con la energía pico almacenada a lo largo de un terremoto; el espectro de pseudo aceleración está referente de manera directa con el costo pico de la fuerza estática equivalente y el corte basal

y así crea la ordenada espectral que es el costo que dependerá de las condiciones del área.

Figura 34. **Espectro de aceleraciones**



Fuente: Saquicela (2016). *Aisladores sísmicos para edificaciones esenciales*.

3.3. Fallas geológicas

Una falla es una fractura de la placa que se forma por un deslizamiento durante el área; en el que el lote experimenta un movimiento vertical u horizontal que se puede prolongar por diversos centenares de kilómetros.

Figura 35. **Fallas de Guatemala**



Fuente: ArcGIS (2020). *Mapa base. Fallas*. Consultado el 3 de mayo de 2021. Recuperado de <https://www.arcgis.com/home/webmap/viewer.html?layers=a61a2509c6bc49729389d16216ae0069>

069

3.4. Aspectos teóricos del diseño estructural

El aspecto de más grande trascendencia para resistir fuerzas sísmicas se fundamenta en un sistema estructural sismorresistente, la mayor parte de dichos sistemas está formado de una conjunción de recursos horizontalmente distribuidos; aun cuando no se debería sorprender que los inmuebles sufran males a lo largo de un terremoto.

3.5. Índice de sismicidad (I_0)

Es una medida relativa de la severidad esperada de un terremoto en un espacio. Índice de protección sísmica sobre el cual se diseñan las construcciones en Guatemala se divide en macrozonas que varían a partir de $I_0=2$ o $I_0=4.2$.

3.6. Período de la estructura

Intervalo de tiempo en el que se hace un periodo completo de desplazamiento. La rigidez y la elevación de la composición son componentes que influyen en el tiempo, y este puede ser numerosa a partir de 0,1 segundos para sistemas básicos, hasta diversos segundos para sistemas de diversos niveles.

Una vez que el tiempo de desplazamiento de una composición coincide o es muy similar al tiempo del suelo, se genera resonancia. Una vez que un inmueble entra en resonancia es bastante factible que se haga un colapso en la composición a menos que el terremoto cese inmediatamente o que la disolución de algunas porciones del inmueble realice que este varíe su frecuencia natural.

3.7. Factor de respuesta sísmica (R)

Es el componente de modificación de respuesta sísmica. Se va a aplicar para minimizar los espectros sísmicos flexibles que representan la amenaza sísmica en el lugar. El costo del parámetro R es dependiente de las propiedades genéricas del sistema estructural seleccionado.

3.8. Factor de sobre resistencia (ΩR)

Es el Elemento de incremento de Resistencia. Se utilizará para incrementar la resistencia flexible de ciertos elementos críticos de una estructura según se sugiere en las Secciones 1.9.4 y 1.9.5 de (AGIES, 2018).

3.9. Factor de incremento del desplazamiento elástico (C_d)

Se usará para amplificar el movimiento que incurre el modelo estructural como consecuencia del estudio flexible para modelar el movimiento post elástico. El movimiento aumentado se comparará con el mayor movimiento post elástico admisible por especificación.

3.10. Peso sísmico efectivo (W_s)

Según la norma AGIES (2018) W_s es el peso de la masa que participa en el sismo. Se utiliza en dichas normas o en otras formulaciones dinámicas. El peso W_s incluirá lo siguiente:

- El peso propio de la estructura.
- La carga muerta superpuesta de la edificación sin contar tabiques.
- El mejor estimado del peso de los tabiques interiores (o 75 kg/m² mínimo).
- El equipo en exceso de 1000 kg anclado a la estructura.
- El 25 % de las cargas vivas de 500 kg/m².
- El 25 % de las cargas vivas que correspondan a artículos embodegados.
- Se permitirá omitir las cargas vivas que califiquen como “reducibles”.
- Se permitirá omitir las cargas vivas en azoteas sin acceso público.

- Se permitirá omitir las cargas vivas en estacionamientos de vehículos de pasajeros, incluyendo áreas de bodegas livianas o domiciliarias asociadas a los estacionamientos.
- Se deberá incluir todas las cargas calificadas como vivas cuando estén rígidamente ancladas a la estructura y excedan 1000 kg.
- Se deberá incluir el peso de jardines, en las áreas que aplique.

3.11. Cortante basal al límite de cedencia

Según las normas AGIES (2018) el total de las fuerzas sísmicas equivalentes que actúan sobre la edificación, en cada dirección de análisis, se representará por medio del cortante estático equivalente al límite de cedencia en la base sísmica de la estructura (V_b) que se obtendrá con la expresión:

$$V_b = C_s * W_s \quad (34)$$

Fuente: AGIES (2018). *Generalidades, administración de las normas y supervisión técnica.*

Donde W_s es el peso sísmico efectivo y C_s es el coeficiente sísmico de diseño.

3.12. Coeficiente sísmico al límite de cedencia (C_s)

Según las normas (AGIES, 2018) el coeficiente sísmico (C_s) en cada dirección de análisis se establecerá de la manera siguiente:

$$C_s = \frac{S_a(T)}{R * \beta_d} \quad (35)$$

Fuente: AGIES (2018). *Generalidades, administración de las normas y supervisión técnica.*

Donde $S_a(T)$ es la demanda sísmica de diseño (pseudo-aceleración inducida en función del periodo) para una estructura con período T obtenida del espectro de diseño sísmico, R es el factor de reducción por ductilidad, β_d se considera para la aplicación de estructuras aisladas y amortiguadas, y así estimar el efecto del amortiguamiento adicional que estos mecanismos proporcionan. En las estructuras convencionales, que tradicionalmente se ha considerado que poseen un amortiguamiento del 5 %, no existirá cambio, ya que con este porcentaje el factor β_d es igual a 1, esos valores de C_s deben cumplir con lo mínimos establecidos mencionados en esta norma.

3.13. Período fundamental de vibración (T_a)

Según las normas AGIES (2018) el periodo fundamental de vibración de una edificación se estimará en forma empírica y genérica como:

$$T_a = K_t * (H_n)^x \quad (36)$$

Fuente: AGIES (2018). *Generalidades, administración de las normas y supervisión técnica.*

Donde H_n es la altura total del edificio, en metros, desde la base, K_t y x dependen según del sistema estructural de la flexibilidad de la estructura, y del daño aceptable para la estructura secundaria. Los períodos T que se utilizarán con el método estático equivalente en la en cada dirección de análisis dadas en esta ecuación.

$$T = T_f \leq 1.4 * T_a \quad (37)$$

Fuente: AGIES (2018). *Generalidades, administración de las normas y supervisión técnica.*

Donde T_f son el período fundamental de vibración de la estructura, para cada dirección de análisis donde se podrán establecer analíticamente tomando en consideración las rigideces y características estructurales de los componentes de una estructura. Se deberá utilizar un método analítico debidamente sustentado en la literatura técnica.

3.14. Métodos de estudio

Hay 3 procedimientos para hacer la exploración de construcciones sísmicamente recluidas, dichos son:

- Método estático (ASCE 7-16) y (AGIES, 2018):
- Procedimiento de fuerza lateral equivalente Métodos dinámicos (ASCE 7-16)
- Procedimiento de respuesta espectral.
- Procedimiento no lineal historia de tiempo.

El procedimiento de estudio que se posibilita utilizar en una composición con aislación sísmica es dependiente de diversos componentes como, por ejemplo: tiempo efectivo de diseño, localización, elevación e irregularidad de la composición, entre otros.

El procedimiento de fuerza lateral equivalente es el más restringido y se posibilita utilizar solo si cumple con los requisitos de la parte 17.4.1 del (ASCE 7-16).

El procedimiento de contestación espectral se puede utilizar si se cumple los requisitos de la parte 17.4.2.1 del (ASCE 7-16).

Al final, el procedimiento de estudio no lineal historia de tiempo se posibilita utilizar en toda clase de construcciones, sin ni una restricción. Sin embargo, si se aplica cualquier persona de ambos métodos de estudio dinámico, los resultados constantemente permanecen limitados a los resultados del procedimiento de fuerza lateral equivalente.

Los primeros 2 procedimientos se fundamentan en espectros sísmicos para representar la carga sísmica y son los que se usan en Guatemala en grupo con los estudios de amenaza sísmica existentes para el territorio.

Además de esta categorización específica, además es viable distinguir 2 conjuntos en general de estudio: basados en la fuerza, y basados en el desplazamiento.

3.14.1. Análisis Modal Espectral

Es un método ventajoso para estimar los desplazamientos y fuerzas en los recursos de un sistema estructural, pues involucra el cálculo de los valores máximos de desplazamientos y las aceleraciones en cada modo de vibración utilizando un espectro de diseño.

El mismo representa el promedio o la envolvente de espectros de respuesta para diferentes sismos, continuamente con varias consideraciones extras expuestas en los códigos de diseño.

El propósito del estudio modal espectral es establecer los métodos naturales de vibración de la composición modelada en 3 magnitudes y lo respectivos períodos de vibración.

Este procedimiento necesita para su aplicación conocer los métodos y frecuencias naturales del sistema de diversos grados de independencia.

La aplicación del procedimiento modal espectral estima un espectro flexible de pseudo aceleraciones de diseño arbitrario, que se especifica para diferentes niveles de magnitud sísmica. En la situación de Guatemala la posibilidad nominal de ocurrencia de los sismos de diseño se determinará conforme el Grado de Defensa Sísmica que se ocupe, por medio de uno de los componentes Kd designados en la Tabla 4.5.5-1 de (AGIES, 2020):

Tabla III. **Factores Kd de acuerdo con el nivel del sismo**

NIVEL DEL SISMO		
Sismo ordinario	10 % de ser excedido en 50 años	0.66
Sismo severo	05 % de ser excedido en 50 años	0.80
Sismo extremo	02 % de ser excedido en 50 años	1
Sismo mínimo	Condición de excepción	0.55

Fuente: AGIES (2018). *Generalidades, administración de las normas y supervisión técnica.*

3.14.2. Calibración del análisis modal

Según las normas AGIES (2018) los cortantes basales dinámicos de la iteración inicial en cada dirección ortogonal horizontal V1X y V1Y no deberán utilizarse para diseño sin antes someterlos a un proceso de calibración.

Los referentes de calibración serán los cortantes estáticos VEX y VEY calculados, con los períodos T obtenidos conforme a lo indicado en la norma. Por tanto, los cortantes basales dinámicos de diseño serán:

$$VDX = \text{Max}(1.0Vex, V1x)$$

$$VDY = \text{Max}(1.0Vey, V1y) \quad (38)$$

Fuente: AGIES (2018). *Generalidades, administración de las normas y supervisión técnica.*

Cuando la estructura no tenga irregularidades en planta ni irregularidades en elevación, entonces se podrá calibrar con:

$$\begin{array}{c} 0.85 * Vex \\ 0.85 * Vey \end{array} \quad (39)$$

Fuente: AGIES (2018). *Generalidades, administración de las normas y supervisión técnica.*

Las fuerzas resultantes del análisis modal se multiplicarán por los factores $VDX/V1x$ y $VDY/V1y$ y se utilizarán para integrar las sollicitaciones sísmicas de diseño.

3.15. Derivas últimas máximas tolerables

Según la norma AGIES (2018) para control de deformaciones horizontales no interesan directamente los desplazamientos absolutos sino las derivas (Δ), definidas como la diferencia entre el desplazamiento de un nodo del diafragma k y el correspondiente nodo en el diafragma $k-1$.

Las derivas últimas ΔU máximas serán los referentes para establecer las derivas laterales tolerables conforme a la tabla que se muestra a continuación:

Tabla IV. **Derivas últimas máximas tolerables**

Clasificación de obra			
Estructura	Categoría II	Categoría III	Categoría IV
Edificaciones NSE 7.4	0.007*hp	0.007*hp	0.007*hp
Edificaciones NSE 7.9	0.010*hp	0.007*hp	0.010*hp
Edificaciones en general	0.020*hp	0.020*hp	0.015*hp

Fuente: AGIES (2018). *Generalidades, administración de las normas y supervisión técnica.*

Los valores máximos de derivas sísmicas se iterará el proceso de análisis hasta que:

$$\Delta_{cp} \geq \frac{\Delta u}{cd} \quad (40)$$

Fuente: AGIES (2018). *Generalidades, administración de las normas y supervisión técnica.*

Donde Δ_{cp} es la deriva de piso causada por sismo, el factor Cd depende de la tipología estructural; y esta condición debe cumplirse para todos los pisos, el código amplió más la definición de Δ_{cp} , como la deriva medida entre centros de masa superior e inferior del piso. Por simplicidad se permite calcular la deriva de piso como el promedio de las derivas extremas en la dirección de análisis.

3.16. Método de fuerza lateral equivalente

El procedimiento de fuerza lateral estática equivalente es una técnica simplificada para reemplazar el impacto de la carga dinámica de un movimiento sísmico deseado por una fuerza estática distribuida lateralmente sobre una composición con objetivos de diseño (Lacayo, 2015).

La fuerza sísmica total aplicada principalmente se evalúa en 2 direcciones horizontales paralelas a los ejes primordiales del inmueble. Implica que la obra responde en su modo lateral importante.

Para que esto sea cierto, la construcción debería ser de escasa elevación y debería ser bastante simétrico para evadir movimientos de torsión bajo los movimientos del suelo.

El procedimiento estima que la composición aislada es lo suficientemente rígida de tal forma que se puede desconocer su flexibilidad. Tal cual la exploración sísmica se hace aceptando a la composición aislada como un modelo de 1GDL.

3.17. Método de estudio historia de tiempo no lineal

Este procedimiento de estudio calcula la respuesta de la estructura para cualquier momento de tiempo desde un registro de aceleraciones debidamente enmendado y escalado. A diferencia de un estudio historia de tiempo lineal, este estudio estima una contestación flexible sólo de la superestructura, y una respuesta inelástica no lineal del sistema de aislamiento, especialmente de los dispositivos.

Hay varios métodos numéricos para obtener la respuesta del inmueble, que varían según la demanda y tiempo computacional que cada método implica, y a varias consideraciones en la conducta del inmueble. De esa manera, el método *Fast Nonlinear Analysis* (FNA) es el más eficiente para inmuebles sísmicamente aislados.

El método FNA es el más correcto para solucionar sistemas estructurales que van a tener primordialmente un comportamiento lineal flexible, con un número reducido de recursos predefinidos con características no lineales. Dichos últimos se refieren a los dispositivos de aislamiento sísmico. Para representar de forma correcta las cargas fijas para los dispositivos friccionantes en este método, va a ser primordial definirla en funcionalidad del tiempo, debiéndose ejercer demasiado lento; o sea, con un amortiguamiento bastante elevado, para no producir vibraciones verticales extras al inmueble. Además, tendrá que ser además del tipo FNA, y precederá al registro de aceleraciones de tal manera que la exploración dinámica se haga con las cargas fijas ya impuestas en la composición.

Para utilizar el procedimiento de estudio historia de tiempo no lineal es preciso:

- Que los modelos de estudio cumplan con los requisitos de la parte 17.6.2 del (ASCE 7-16).
- Un mínimo de 7 pares de registros sísmicos que tienen que estar escalados al espectro de aceleraciones que tiene una posibilidad de excedencia de 2 % en 50 años.
- El rango de periodos para el escalamiento debería estar entre $0.75T_M$ (T_M calculado para las características *Upper Bound* del sistema de aislación) y $1.25T_M$ (T_M calculado para las características *Lower Bound* del sistema de aislación).

Sobre las fuerzas laterales mínimas para el diseño:

- Sistema de aislamiento y recursos estructurales abajo del Grado vital. Parte 17.6.4.1 del ASCE 2016, sugiere que la fuerza lateral de diseño no debería tomarse como menos del 90 % de V_b .
- Recursos estructurales por arriba del grado base. Parte 17.6.4.2 del (ASCE 7-16), sugiere que la cortante basal V_s ; en construcciones regulares se admite al menos el 80 % y V_s en construcciones irregulares se admite por lo menos el 100 %, el V_s es el costo calculado por el procedimiento de Fuerza Lateral Equivalente, además V_s no va a ser tomado como menos del 100 % de los parámetros especificados en la parte 17.5.4.3 del (ASCE 7-16).

3.18. Programa ETABS

ETABS es un programa que se usa para el estudio estructural y el dimensionamiento de inmuebles, de esta forma tendrás la posibilidad de descubrir diversas posibilidades para experimentar con una vasta gama de materiales, de igual modo, tendrás la posibilidad de hacer diseños esquemáticos e informes de proyectos.

Sin embargo, el programa además cuenta con visualización 3D y gráficos explicativos para diseñar construcciones de albañilería confinada y de concreto armado, a diferencia de otros softwares, en ETABS tendrás la posibilidad de ir paso a paso en el modelado a detalle de construcciones.

El programa trae lo cual son el modelamiento no lineal y la investigación sísmico de las construcciones y las configuraciones para aisladores sísmicos.

3.18.1. Análisis historia de tiempo en ETABS

El programa ETABS posibilita hacer 2 tipos diferentes de estudio. El primero corresponde al caso de un inmueble sometido a una aceleración en su base, en lo que el segundo caso es el de un inmueble, con base fija, sometido a un grupo de cargas que varían en el tiempo, como ocurre en la situación de un inmueble frente a la acción de ráfagas de viento.

3.18.2. Función de análisis historia de tiempo

El primer paso para realizar un análisis es definir una función de historia en el tiempo. El software ETABS detalla los pasos para determinar una función historia de tiempo. Esta función es una colección de pares de valores de tiempo-aceleración cuyos valores están determinados por una función que se puede utilizar como valor de aceleración base o como multiplicador en el caso de una carga estática de fuerza o movimiento.

El programa ETABS define funciones por nombre y de una de las siguientes maneras:

- Seleccione un archivo de texto que contenga funciones en orden cronológico si el archivo contiene pares de datos o para acelerar intervalos de tiempo fijos de valores.
- Introduzca manualmente sus datos personales utilizando el teclado para cada par de valores (t, ft).
- Seleccione las funciones disponibles en su programa: seno, coseno, rampa, diente de sierra y triángulo.

4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

4.1. Caso 1. Hospital

Se aplicará a un edificio hipotético ubicado en el municipio de San Pedro Pinula Jalapa, la edificación es un hospital a la cual le corresponde la categoría IV de obras esenciales de acuerdo con la norma de la NSE-1 de AGIES.

La cual se compone de una edificación de cuatro niveles más techo, conformada por marcos dúctiles de concreto reforzado que forman el sistema sismorresistente del edificio. La losa será de tipo losa maciza, armadas en dos direcciones de 0.20 m de peralte incluyendo el techo.

Las columnas en general serán de 0.50x0.50 m y de 0.80x0.80 m en los niveles, las vigas interiores y exteriores se han planteado con secciones de 0.40x0.60 m y 0.50x0.70 m respectivamente.

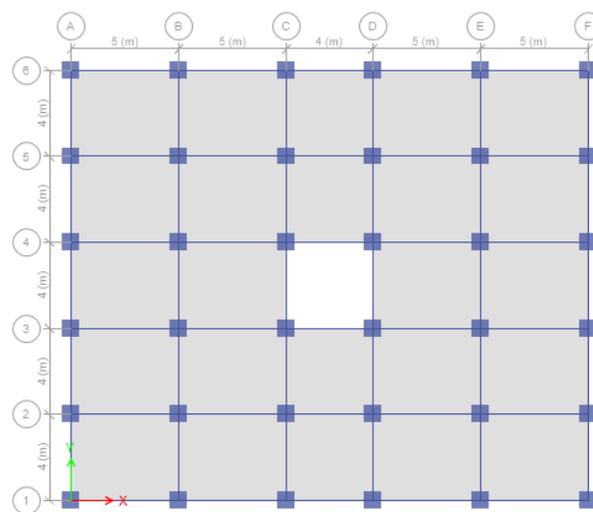
La cimentación posibilita modelar como empotrados en los apoyos en la base de la composición. Además, se asumirá que las losas de concreto armado poseen la rigidez y resistencia suficiente para funcionar como diafragma rígido.

En la norma guatemalteca AGIES se considera el hospital como una edificación esencial para el diseño se usará el factor de modificación de respuesta sísmica $R= 8$ un factor de incremento de resistencia $\Omega= 3$ y factor de incremento del desplazamiento elástico $C_d= 5.5$.

Los hospitales, conforme con la norma AGIES son considerados construcciones esenciales y se hallan en la categorización de obra importante , cuyo comienzo busca afirmar que las construcciones fundamentales permanezcan en condiciones operativas después de un movimiento sísmico severo, por esa razón su funcionalidad no debe interrumpirse rápidamente luego de ocurrido un terremoto, por esto estas construcciones tienen que precisamente calificar como construcciones que a la acción de un movimiento sísmico severo el daño no sea mayor del 2 % del costo de remplazo, dichos requerimientos de la norma van a ser satisfechos llevando a cabo el diseño tomando en cuenta el diseño con una rigidez que posibilite mantener el control de las derivas de entrepiso.

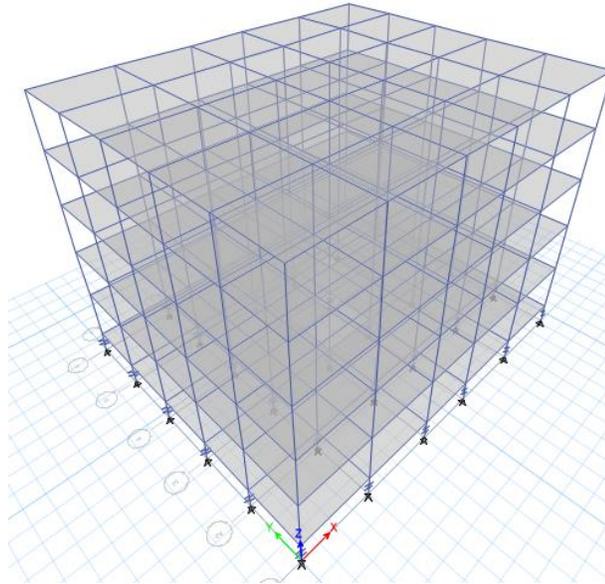
A continuación, se muestra el modelo de la distribución en planta, elevación y perspectiva 3D de la edificación.

Figura 36. **Vista en planta del edificio hospital**



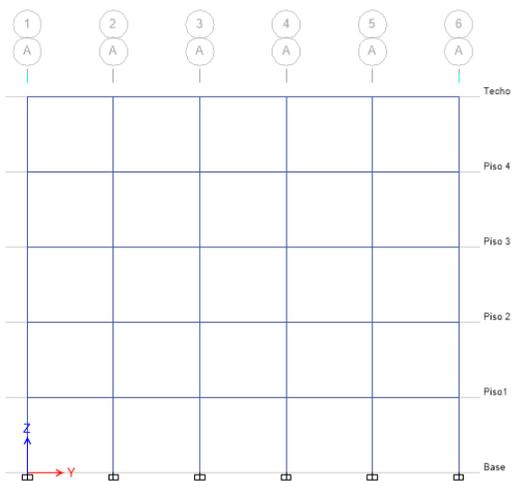
Fuente: elaboración propia, realizado con software ETABS.

Figura 37. **Vista en 3D del edificio hospital**



Fuente: elaboración propia, realizado con software ETABS.

Figura 38. **Vista en elevación del edificio hospital**



Fuente: elaboración propia, realizado con software ETABS.

Se trabajará con el concreto reforzado para todos los elementos estructurales cuyas propiedades se muestran a continuación:

Tabla V. **Elementos estructurales del edificio hospital**

Concreto reforzado	
Resistencia concreto	$F'c = 280 \text{ Kg/cm}^2$
Peso específico	$Ym = 2400 \text{ kg/cm}^3$
Módulo de elasticidad	$Ec = 2387519641.63 \text{ kg/m}^3$
Módulo de corte	$Gc = 94562,583 \text{ Kg=cm}^2$
Módulo de poisson	$\nu = 0,15$
Resistencia fluencia del acero	$fy = 4200 \text{ Kg=cm}^2$

Fuente: elaboración propia.

Las características y las cargas adoptadas al edificio son:

Tabla VI. **Características y las cargas adoptadas al edificio hospital**

Sistema estructural	E-1
R	8
Sobre resistencia Ω	3
Cd	5.5
Clasificación de la obra	Esencial
Nivel de protección sísmica	E
Sismo de diseño	EXTREMO
Datos:	Hospital 4 niveles + techo
Departamento:	Jalapa
Municipio:	San Pedro Pinula
Ubicación	Centro San Pedro Pinula
Altura del edificio	17.5 metros
Carga viva según piso 1 a 3	500 KG/M2
Carga viva piso 4	250 KG/M2
Carga viva techo	100 KG/M2
Sobrecarga muerta piso 1 a 4	400 KG/M2
Sobrecarga muerta techo	250 KG/M2

Fuente: elaboración propia.

El primer paso para hacer el ejemplo de aplicación ha sido la investigación estructural de la construcción sin disipadores. Por lo cual se utilizó el procedimiento modal espectral, y se construyó un espectro genérico de respuesta aplicable para la localidad de Guatemala. Este estudio permitió decidir los tamaños de los recursos estructurales, y el chequeo de las derivas permitidas; obteniendo el predimensionamiento de una construcción completa a la cual ha sido viable hacer otros estudios. Para la exploración se hizo un modelo en 3 magnitudes de la composición en el programa ETABS, lo que se realizó un estudio modal espectral y se construyó el espectro de respuesta aplicable para el análisis lineal de la estructura, ubicada en San Pedro Pinula, Jalapa. El método se logró conforme con la NSE-3, 2018 de la norma AGIES En la siguiente tabla se muestran los datos utilizados para la composición de ejemplo.

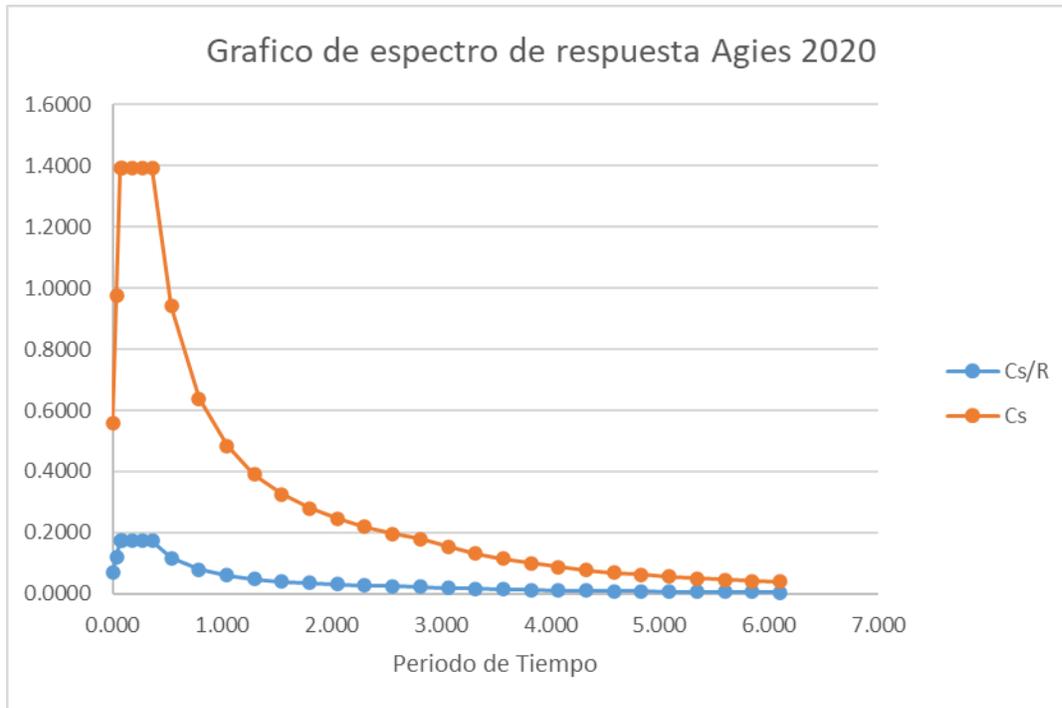
Tabla VII. **Datos para el espectro de respuesta San Pedro Pinula, Jalapa**

Ordenada espectral de periodo corto	Scr	1.74
Ordenada espectral con periodo de 1 segundo	S1r	0.63
Índice de sismicidad	Io	4.1
Clase de sitio	Cs	C
Tipo de fuente sísmica	Fuente	A
Distancia horizontal cercana a la fuente sísmica	Distancia	≥ 15 Km
Tipo de sismo	Sismo	Extremo
Periodo largo de transición	TL	2.89

Clasificación de Sitio:	C	periodos de transición	
Fa:	1	Ts:	0.362068966
Fv:	1	To:	0.072413793
Na:	1	TL:	2.89
Nv:	1	Kd:	1
Scs:	1.74	Scd:	1.74
S1s:	0.63	S1d:	0.63
		Amsd	0.696

Fuente: elaboración propia.

Figura 39. **Espectro de respuesta San Pedro Pinula, Jalapa**



Fuente: elaboración propia.

Donde Cs es el coeficiente sísmico de diseño definido en la norma NSE-2-2018 de AGIES y S(T) que es la demanda sísmica de diseño para una estructura con un período (T) obtenida del espectro de diseño sísmico establecido para el sitio de la norma NSE-2- 2018.

Tabla VIII. **Datos para la obtención del espectro de respuesta de la edificación del hospital**

T [seg]	Sa(T)	Cs=Sa(T) /R
0.0000	0.696	0.0870
0.0724	1.740	0.2175
0.3621	1.740	0.2175
0.4000	1.575	0.1969
0.4410	1.429	0.1786
0.4890	1.288	0.1610
0.5354	1.177	0.1471
1.0000	0.630	0.0788
1.5000	0.420	0.0525
1.7600	0.358	0.0447
2.0000	0.315	0.0394
2.8900	0.218	0.0272
3.5000	0.149	0.0186
4.0000	0.114	0.0142
4.5000	0.090	0.0112
5.0000	0.073	0.0091
5.5000	0.060	0.0075

Fuente: elaboración propia.

El siguiente paso es determinar el período empírico de la estructura, por lo cual se define según el sistema estructural los datos de K_t y x , según de la norma NSE3-2018.

$$T_a = K_t \cdot (H_n)^x \quad (41)$$

Fuente: AGIES (2018). *Generalidades, administración de las normas y supervisión técnica.*

Donde H_n es la altura total del edificio, en metros, desde la base definida, K_t y x se tomará según el tipo de sistema estructural con los valores que establece la NSE3-2018 en ese caso se usó: $K_t=0.047$ y $x= 0.85$.

Tabla IX. **Datos para la obtención del Ta**

Kt=	0.047
x=	0.85
Hn=	17.5 mts
Ta=	0.535402259 segundos

Fuente: elaboración propia.

Para obtener el valor del coeficiente sísmico se emplean las mismas ecuaciones utilizadas para construir el espectro de respuesta.

$$T_s = \frac{S_{1s}}{S_{cs}} = \frac{0.63}{1.74} = 0.36 \quad (42)$$

Fuente: AGIES (2018). *Generalidades, administración de las normas y supervisión técnica.*

$$C_s = \frac{S_a(T)}{R*\beta d} = \frac{1.74}{8*1} = 0.21 \quad (43)$$

Fuente: AGIES (2018). *Generalidades, administración de las normas y supervisión técnica.*

4.1.1. **Combinaciones de carga**

Para el diseño de los elementos estructurales de la construcción se emplearon las combinaciones de carga para diseñar por resistencia, establecidas en AGIES NSE-2, en el capítulo 8, parte 8.3.

Cada una de las combinaciones, como para cargas gravitacionales como de terremoto, se enlistan en esta tabla. En la situación de carga sísmica es

considerada la integridad el terremoto en la dirección de interés, y un 30 % en la dirección perpendicular, y se sugiere la dirección del movimiento sísmico, tanto si es X o Y, como el sentido positivo o negativo.

Tabla X. **Combinaciones de carga para el edificio**

Combinaciones de cargas	
CR1	$1.4 \cdot CM$
CR2	$1.2 \cdot CM + 1.6 \cdot CV + 0.5(Vt, PI, Ar)$
CR3	$1.2 \cdot CM + 1.0 \cdot CV + 0.1.6(Vt, PI, Ar)$
CR4X(+,+)	$1.2 \cdot CM + CV + Sx + 0.3Sx$
CR4X(+,-)	$1.2 \cdot CM + CV + Sx - 0.3Sx$
CR4X(-,+)	$1.2 \cdot CM + CV - Sx + 0.3Sx$
CR4X(-,-)	$1.2 \cdot CM + CV - Sx - 0.3Sx$
CR4Y(+,+)	$1.2 \cdot CM + CV + Sy + 0.3Sy$
CR4Y(+,-)	$1.2 \cdot CM + CV + Sy - 0.3Sy$
CR4Y(-,+)	$1.2 \cdot CM + CV - Sy + 0.3Sy$
CR4Y(-,-)	$1.2 \cdot CM + CV - Sy - 0.3Sy$
CR5X(+,+)	$0.9 \cdot CM + Sx + 0.3Sx$
CR5X(+,-)	$0.9 \cdot CM + Sx - 0.3Sx$
CR5X(-,+)	$0.9 \cdot CM - Sx + 0.3Sx$
CR5X(-,-)	$0.9 \cdot CM - Sx - 0.3Sx$
CR5Y(+,+)	$0.9 \cdot CM + Sy + 0.3Sy$
CR5Y(+,-)	$0.9 \cdot CM + Sy - 0.3Sy$
CR5Y(-,+)	$0.9 \cdot CM - Sy + 0.3Sy$
CR5Y(-,-)	$0.9 \cdot CM - Sy - 0.3Sy$

Fuente: AGIES (2018). *Generalidades, administración de las normas y supervisión técnica.*

4.1.2. **Análisis historia de tiempo selección de acelerogramas**

Para hacer el estudio historia de tiempo, se debería de elegir y adecuar los acelerogramas se tomó con base del Centro de Estudios Superiores de Energía y Minas de la Universidad San Carlos de Guatemala y además se logró la indagación en la Red Acelerográfica del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (RAII-UNAM).

Donde este sistema posibilita al cliente hallar la información disponible, por medio de consultas al catálogo de sismos o por la combinación de parámetros involucrados con la estación de registro, fecha de ocurrencia, aceleración registrada o distancia radial. Como la finalidad de la presente investigación en la aplicación de los acelerogramas adecuados, únicamente se citará lo cual se considere fundamental para los fines del trabajo de investigación.

Sin embargo, se sugiere la profundización en el documento como lo dicta la norma ASCE (s.f.) de que requiere un mínimo de 7 pares de registros sísmicos que deben estar escalados al espectro de aceleraciones, debido al gran aporte que tiene en la comprensión de la implementación de registros sísmicos para el estudio de construcciones, y que en la actualidad es limitado el acceso a este tipo de información en Guatemala.

Los acelerogramas a usar tienen la posibilidad de escogerse con base a un espectro de respuesta de referencia. En esta situación tienen que seleccionarse registros cuyos espectros tengan una forma semejante al espectro objetivo de la norma (AGIES, 2018).

4.1.3. Parámetros de selección de acelerogramas

Los acelerogramas a usar tienen la posibilidad de escogerse con base a un espectro de respuesta de referencia. En esta situación tienen que seleccionarse registros cuyos espectros tengan una forma semejante al espectro objetivo que se usaría de (AGIES, 2018).

Para la investigación del análisis historia de tiempo se escogió el registro del movimiento sísmico de la estación SAN CRISTOBAL DE LAS Casas CB 11 situado en la escuela de Bachilleres Plantel Núm. 11. Calzada de la Juventud

núm. 50, Barrio María Auxiliadora. San Cristóbal de las Casas, Chiapas de la fuente de Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México del registro seleccionado en la página (RAII-UNAM, 2018) y también se escogió el segundo registro de la base del Centro de Estudios Superiores de Energía y Minas de la Universidad San Carlos de Guatemala por lo que se seleccionaron dichos registros gracias al parecido de su espectro de respuesta con el espectro genérico de (AGIES, 2018).

Figura 40. **Vista de sismo mayores de 6 Mw de fecha 15/04/2016**



Fuente: RAII-UNAM (2018). *Base de datos de registros acelerográficos de la RAII-UNAM.*
Consultado el 3 de mayo de 2021. Recuperado de <http://aplicaciones.iingen.unam.mx/>

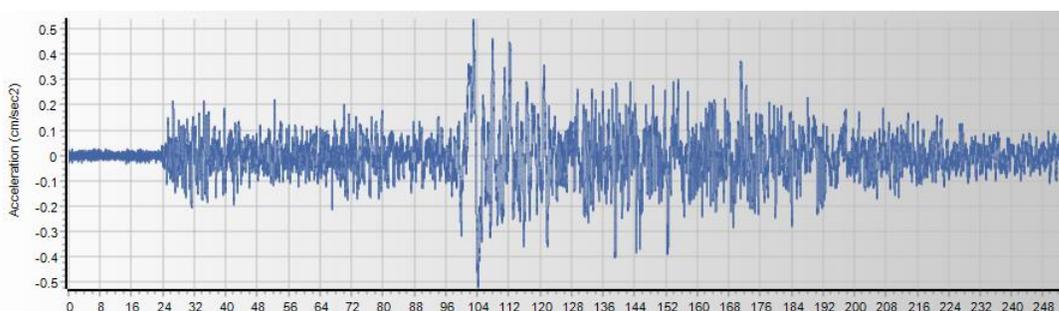
4.1.4. Escalado de los registros sísmicos

En las múltiples metodologías para hacer el escalado de los registros sísmicos para un espectro de diseño, emplearemos el programa especializado *SeismoMatch 2021* la cuales una aplicación capaz de ajustar acelerogramas de sismos para que coincida con un espectro de respuesta objetivo específico, usando el algoritmo de wavelets postulado por Abrahamson en 1992 y Hancock en el 2006.

Según lo recomendado por el ASCE 2016 el escalado se hace en un rango de periodos entre 0.75TM a 1.25TM. Sin embargo, como aun no contamos con las características del sistema de aislación y con el fin de tener en cuenta un rango de periodos amplios, definimos un rango de periodos entre 0.1 a 4.0 seg.

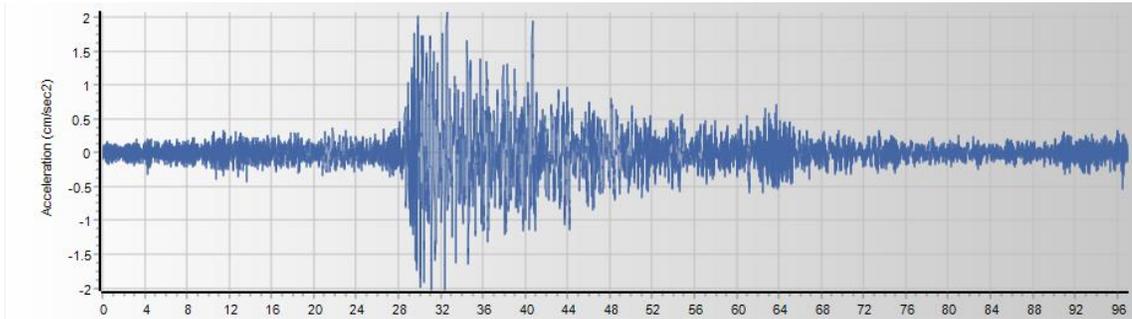
Se Procede importando el elemento en formato de texto de nuestro registro sísmico de San Cristóbal y de la Cesem al programa *Seismomatch* que se hallan en unidades Gal (cm/s²), como se muestra en la figura.

Figura 41. **Importación de registro San Cristóbal a escalar usando *Seismomatch***



Fuente: elaboración propia, realizado con software ETABS.

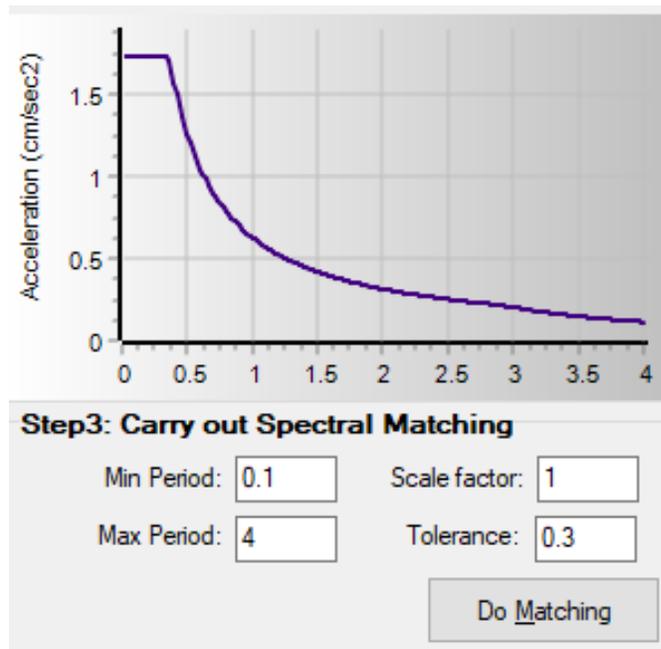
Figura 42. **Importación de registro Cesem a escalar usando *Seismomatch***



Fuente: elaboración propia, realizado con software ETABS.

Una vez tengamos nuestro elemento de manera correcta importada, procedemos a conceptualizar nuestro espectro objetivo o de diseño, en la pestaña *Define the Target Spectrum*. Y procedemos a configurar el tiempo mínimo y mayor que se estima para escalar la elemento. Después presionamos la pestaña *Do Matching* para comenzar el escalado de los valores del elemento ingresado, este método se muestra en la figura. En este se aplicará en los dos registros que se utilizará.

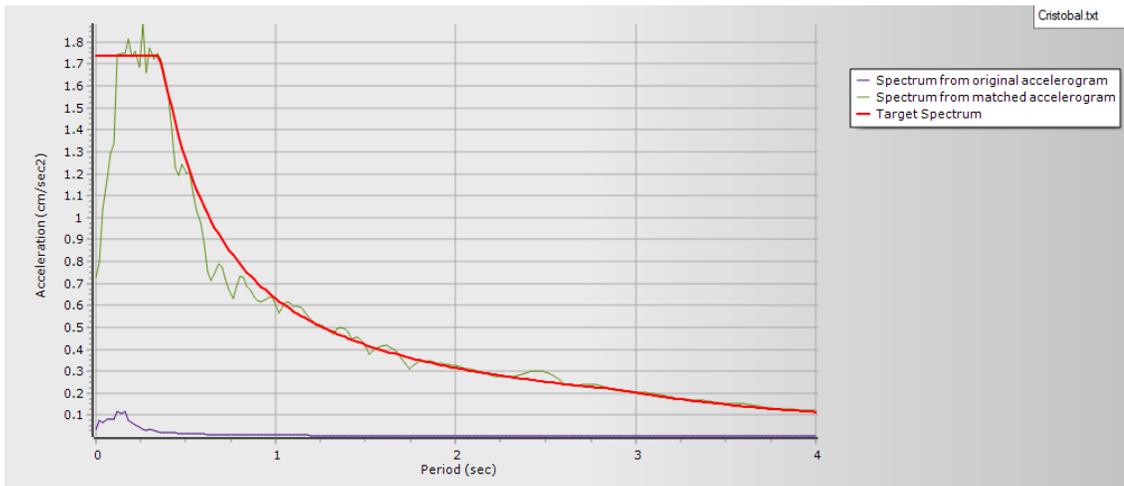
Figura 43. **Espectro objetivo y parámetro a escalar utilizando *Seismomatch***



Fuente: elaboración propia, realizado con software ETABS.

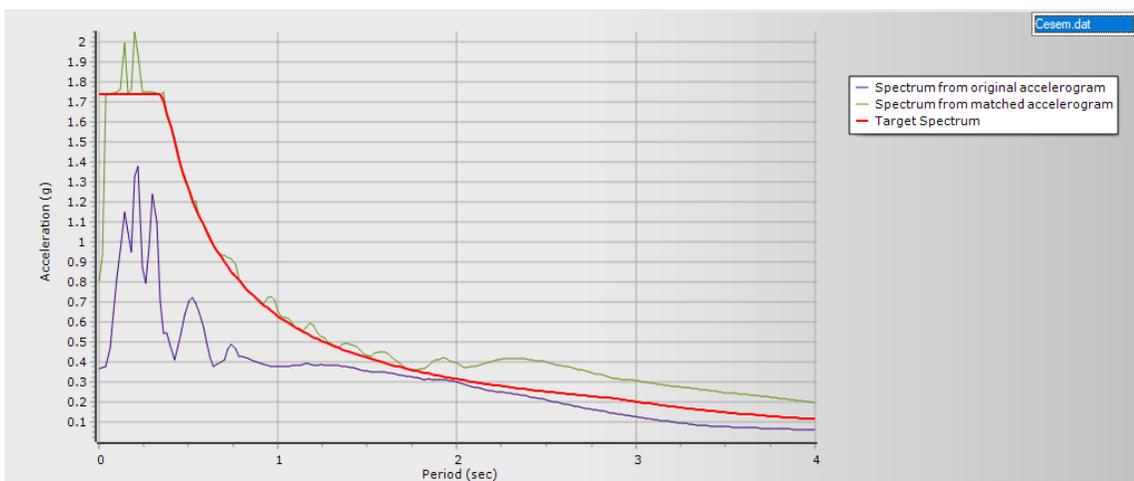
Al final el programa ha llevado a cabo el escalado del registro ingresado el cual podemos exportar los datos necesarios escalados, este método se muestra en las figuras.

Figura 44. **Resultado del componente escalado San Cristóbal utilizando Seismomatch**



Fuente: elaboración propia, realizado con software ETABS.

Figura 45. **Resultado del componente escalado Cesem utilizando Seismomatch**



Fuente: elaboración propia, realizado con software ETABS.

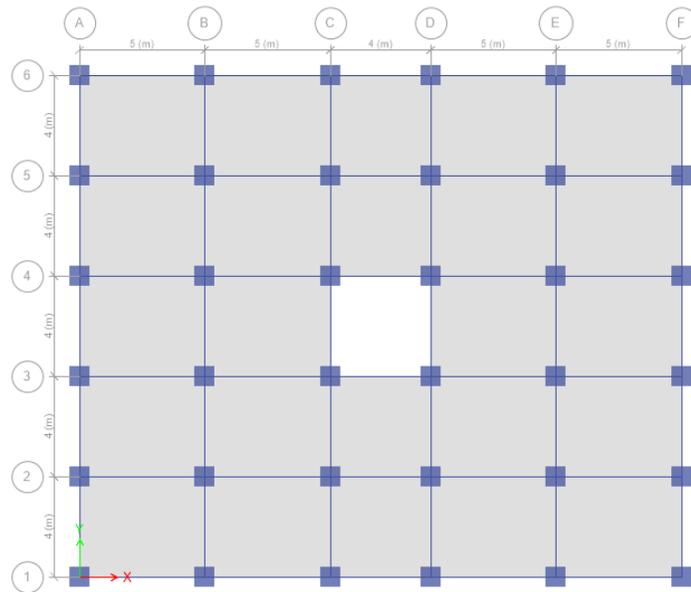
4.1.5. Ubicación de aisladores

Para estructuras que son regulares los aisladores friccionales se distribuyen en planta en funcionalidad del peso de cada columna. Para edificios con cierta irregularidad de rigidez en planta, los aisladores se distribuyen de forma que la rigidez que aporte cada aislador ayude a que los métodos primordiales de vibración tengan una trascendencia de al menos 90 % en cada dirección.

Una repartición general es tener aisladores centrales, aisladores de borde y los aisladores de esquina. No obstante, además se puede poner un solo tipo de aislador de forma tal que su rigidez y amortiguamiento multiplicado por el número de aisladores resulten la rigidez y amortiguamiento efectivo del inmueble.

En planta, se sitúa un tipo de aislador FPT en cada columna (dando un total de 36 aisladores), y en altura (interfaz de aislación) se localizan bajo la losa de la planta baja y sobre pedestales de hormigón armado, para asegurar un óptimo comportamiento del inmueble en un terremoto, es preferible evadir métodos torsionales de vibración. De modo que, se trató de que el centro de masa acumulada sea muy semejante al centro de rigidez acumulada. Tras una secuencia de iteraciones se localizó la siguiente repartición en planta de la misma forma que se muestra en la figura.

Figura 46. **Ubicación de los aisladores FPT en el proyecto del hospital**



Fuente: elaboración propia, realizado con software ETABS.

Para las cargas del inmueble se consideró las normas de cargas (AGIES, 2018).

Tabla XI. **Masas y pesos por nivel del edificio**

Nivel	Masa tonf-s ² /m	Peso tonf
Techo	21.5773	211.6733
Piso 4	25.6158	251.2909
Piso 3	30.4572	298.7851
Piso 2	36.4772	357.8413
Piso1	36.4772	357.8413
Suma	150.605	1477.4320

Fuente: elaboración propia.

4.1.6. Análisis de modos

Como se observa en la tabla, el tiempo (T) es alrededor de 0.49 seg por lo cual está conforme con la aproximación con el procedimiento estático.

Tabla XII. **Modos de vibración del edificio**

Case	Mode	Period sec
Modal-Ritz	1	0.489
Modal-Ritz	2	0.441
Modal-Ritz	3	0.414
Modal-Ritz	4	0.185
Modal-Ritz	5	0.173
Modal-Ritz	6	0.143
Modal-Ritz	7	0.102
Modal-Ritz	8	0.083

Fuente: elaboración propia.

4.1.7. Análisis por el método de fuerza equivalente

Se procedió a hacer estos cálculos demostrado en la siguiente tabla utilizando la norma AGIES (2018) y la norma ASCE (s.f.) para los parámetros necesarios en aisladores de base.

Tabla XIII. **Procedimiento para fuerza lateral equivalente**

Procedimiento para fuerza lateral equivalente			
Procedimiento para estimar la fuerza lateral			
$F_s = C_s \times W_s$			
$F_s =$	321.341	T_n	Cortante Maximo ($C_s \times W_s$)
$C_s =$	0.21		Coficiente Simico
$W_s =$	1477.432	T_n	Peso Sismico de la Estructura

Fuente: elaboración propia.

El análisis del sistema y la estructura de aislamiento debe ser realizado por separado para propiedades de límite superior e inferior, y el caso gobernante para cada parámetro de respuesta se utilizará para el diseño como se indica a continuación.

Tabla XIV. **Procedimiento Cs de no superar los límites establecidos de la norma (ASCE 7-16)**

Scr=	1.74
S1r=	0.63
T objetivo	1.96
Altura h =	17.50

Límites Superior:		
CS no debe superar los siguientes límites:		
Si: $T \leq TL$		
CS=	0.040	
T	1.960	seg
TL	2.89	seg
Si: $T > TL$		
CS=	FALSO	
T	1.960	seg
TL	2.89	seg
Límite Inferior:		
CS no deberá ser menor a:		
CS=	0.077	> 0.01

CS=	0.059	
Por lo tanto: CS=	0.077	0.040
Resumen:		
Fs=	113.112 Tn	Fuerza lateral equivalente para diseñar estructuras aisladas

Fuente: elaboración propia.

Según la ASCE (s.f.) los desplazamientos laterales mínimos requeridos para el diseño del sistema de aislamiento deben estar diseñado y construido para

resistir, como mínimo, del desplazamiento máximo (DM) determinado utilizando el límite superior y propiedades de límite inferior, en la dirección más crítica de respuesta horizontal, calculada usando esta ecuación.

$$Dm = \frac{gSm1Tm}{4\pi^2Em} \quad (44)$$

Fuente: ASCE (s.f.). *Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures* 7-16.

El período efectivo de la estructura aislada T_m en el desplazamiento máximo, DM, se determinará utilizando características de deformación de límite superior e inferior del sistema de aislamiento.

$$Tm = 2\pi \sqrt{\frac{W}{Kmg}} \quad (45)$$

Fuente: ASCE (s.f.). *Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures* 7-16.

Según la ASCE (s.f.) el desplazamiento máximo total D_{tm} de los elementos del sistema de aislamiento debe incluir el desplazamiento adicional causado por accidentes reales y accidentales torsión calculada a partir de la distribución espacial del lateral de rigidez del sistema de aislamiento y las más desventajosas de la ubicación de la masa excéntrica. El desplazamiento máximo total de elementos de un sistema de aislamiento no se tomará como menos de lo prescrito anteriormente derivado a esta ecuación.

$$Dtm = Dm \left[1 + \frac{y}{P^2T} * \frac{12e}{b^2+d^2} \right] \quad (46)$$

Fuente: ASCE (s.f.). *Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures 7-16.*

Tabla XV. **Procedimiento desplazamientos laterales mínimos de la norma (ASCE 7-16)**

DESPLAZAMIENTO LATERALES MINIMOS				
Desplazamiento de Diseño DD:				
DD=	0.08	m	=7.67	cm
g=	9.81	m/s ²		
S1D=	0.42			
TD=	1.102	seg		
BD=	1.500			
βD=	20			
Periodo Efectivo en desplazamiento de Diseño TD:				
TD=	1.102	seg		
W=	1477.432	Tn	14493.608	KN
KDmin=	4898.589	Tn/m	48.055	KN/mm
Resumen:				
DD=	7.665	cm	Desplazamiento de	diseño

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVI. **Procedimiento desplazamientos laterales máximos de la norma (ASCE 7-16)**

Desplazamiento de Máximo DM:			
DM=	0.133	m	13.29 cm
S1D=	0.63		
TM=	1.273	seg	
BM=	1.500		
Periodo Efectivo para Desplazamiento máximo esperado TM:			
TM=	1.273	seg	
W=	1477.432	Tn	14493.608 KN
Kmmin	3669.295	Tn/m	35.996 KN/mm
g=	9.81	m/s ²	
Resumen:			
DM=	13.285	cm	Desplazamiento máximo

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVII. **Procedimiento desplazamiento total de diseño D_{tm} de la norma (ASCE 7-16)**

Desplazamiento Total para Diseño D_{TM} y para Máximo Esperado D_{TM}			
y=	820.51	cm	
b=	1500	cm	
d=	3000	cm	
e=	46.41	cm	-
DTD=	7.977	cm	
DTM=	13.825	cm	
Resumen:			
DTD=	7.977	cm	Desplazamiento total de diseño
DTM=	13.825	cm	Desplazamiento total máximo esperado

Fuente: elaboración propia.

Las unidades utilizadas en la construcción serán establecidas por el profesional registrado en diseño. El programa de prueba debe evaluar la consistencia de los valores medidos de la unidad de aislamiento nominal propiedades probando el 100 % de los aisladores en combinación compresión y

corte en no menos de dos tercios del desplazamiento máximo DM determinado utilizando límite inferior propiedades. Los resultados medios de todas las pruebas deben estar dentro del rango de valores definidos por los valores $\lambda_{\text{spec, max}}$ y $\lambda_{\text{spec, min}}$ establecidos en la norma (ASCE, s.f.).

Se permite utilizar un rango de valores diferente para las unidades de aislamiento individuales y para el valor medio. en todos los aisladores de un tipo de unidad dado, siempre que las diferencias en los rangos de valores se tienen en cuenta en el diseño de cada elemento del sistema de aislamiento, como se prescribe en la norma ASCE (s.f.) en esto se sacó los valores para la propiedad de la aislación.

Tabla XVIII. **Procedimiento sistema de aislación de la norma (ASCE 7-16)**

PROPIEDADES DEL SISTEMA DE AISLACION		
Máximo y Mínima Rigidez Efectiva:		
Para Diseño:		
KD _{MAX} =	30.749	kN/mm
F _{max+}	837.20	Tn
F _{max-}	837.20	Tn
D _d =	0.2671	m
KD _{MIN} =	48.06	kN/mm
F _{min+}	1111.00	Tn
F _{min-}	1111.00	Tn
D _d =	0.2268	m
Para Máximo Sismo Considerando: MCE		
KM _{MAX} =	32.56	kN/mm
F _{max+}	1586.00	Tn
F _{max-}	1586.00	Tn
D _m =	0.4779	m
KM _{MIN} =	36.00	kN/mm
F _{min+}	1489.00	Tn
F _{min-}	1489.00	Tn
D _m =	0.4058	m

Fuente: elaboración propia.

Los sistemas de aislamiento y elementos estructurales debajo del nivel de la base deben diseñarse y construido para soportar una fuerza sísmica lateral mínima V_b utilizando todos los requisitos aplicables para un sistema no aislado estructura según lo prescrito por la norma ASCE (s.f.) y determinado utilizando aislamiento de límite superior e inferior propiedades del sistema como se muestra en las siguientes ecuaciones.

$$V_b = Km * Dm \quad (47)$$

Fuente: ASCE (s.f.). *Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures 7-16.*

Tabla XIX. **Procedimiento fuerza lateral mínima sub estructura (ASCE 7-16)**

$V_b=$	2356.971	kN	$V_b/9.81=240.262$	Tn
$KD_{MAX}=$	30.749	KN/mm		
$DD=$	76.653	mm		
$V_b=$	240.262	Tn	Fuerza lateral mínima sub estructura por debajo S-A	

Fuente: elaboración propia.

La estructura por encima del nivel de la base debe diseñarse y construido usando todos los requisitos aplicables para una estructura no aislado de una fuerza cortante mínima V_s determinada utilizando las propiedades del sistema de aislamiento de límite superior e inferior según lo prescrito por la norma ASCE (s.f.).

El factor R_I se basará en el tipo de fuerza sísmica que resiste sistema utilizado para la estructura por encima del nivel de la base en la dirección de interés y será tres octavos del valor de R dado en las tablas que está en la norma

ASCE (s.f.), con un valor máximo no mayor que 2.0 y un valor mínimo no inferior a 1.0.

Tabla XX. **Procedimiento fuerza lateral mínima superestructura (ASCE 7-16)**

Elementos estructurales de la superestructura por encima del sistema de aislamiento			
Vs=	1178.485	kN	Vs/9.81=120.131 Tn
KDMAX=	30.749	KN/mm	
DD=	76.653	mm	
RI=	2	Tabla ASCE 7-16	

Vs= 120.131 Tn	Fuerza lateral mínima superestructura
-----------------------	--

Fuente: elaboración propia.

El valor de Vs no se tomará como menos que cada uno de los siguientes: Cuando la fuerza sísmica lateral requerida por la norma ASCE (s.f.) para un estructura de base fija del mismo peso sísmico efectivo, Ws, y un período igual al período del sistema de aislamiento utilizando las propiedades del límite superior TM; el corte de la base correspondiente al viento de diseño factorizado de las carga y la fuerza sísmica lateral, Vst, calculada mediante la ecuación anteriormente y con Vb igual a la fuerza requerida para activar completamente el sistema de aislamiento utilizando el mayor de los límites superiores propiedades, o 1.5 veces de las propiedades nominales para el nivel de rendimiento de un sistema de ablandamiento, también la fuerza de fricción de ruptura de un sistema deslizante o la fuerza de desplazamiento cero de un sistema de deslizamiento siguiendo un ciclo dinámico completo de movimiento en DM.

Tabla XXI. Límites de cortante (ASCE 7-16)

Límites del Cortante VS			
El cortante Vs no sera como menos que:			
Vs=	165.677	Tn	
Vs=	329.175	Tn	
Vs=	329.175	Tn	Fuerza lateral diseño

Fuente: elaboración propia.

El sistema de aislamiento debe configurarse, tanto para el límite superior como para el límite inferior de las propiedades del sistema, para producir una fuerza restauradora tal que la fuerza lateral en el desplazamiento máximo correspondiente está en menos 0.025 Ws mayor que la fuerza lateral al 50 % del correspondiente desplazamiento máximo según lo que indica la norma (ASCE, s.f.).

Tabla XXII. Fuerza lateral de recuperación del aislador (ASCE 7-16)

Fuerza lateral de recuperación en el sistema de aislamiento			
FLTD=	2452.708	kN	FLTD/9.81=250.021 Tn
KDMAX=	30.749	KN/mm	
DTD=	79.767	mm	
Resumen:			
FREC MIN=	Ws*0.025=	Tn	
	36.936		
FREC MAX=	0.5*FLTD=	Tn	
	125.011		

Fuente: elaboración propia.

4.1.8. Diseño del aislador péndulo interior para sismos frecuentes en servicio

Se diseña el aislador a base de las fórmulas propuestas.

Figura 47. **Péndulo interior para sismos frecuentes**



Fuente: Constantinou, Aguilar, Morales y Caiza (2016). *Desempeño de aislador fpt8833/12-12/8-5 en el análisis sísmico del centro de investigaciones y de post grado de la UFA-ESPE.*

Tabla XXIII. **Diseño del péndulo interior para sismos frecuentes**

# aisladores	36	unidades
Peso de la estructura:	1477.2	Tn
Periodo fundamental sin aislación:	0.5	seg
Periodo objetivo TS:	1.96	seg
factor de resguardo	2	
coeficiente fricción mínimo $\mu_{min} =$	0.04	
coeficiente fricción max $\mu_{max} =$	0.07	
resistencia teflón a tensión	4500	Tn/m ²
coeficiente de amortiguación β_d o β_m	15%	
densidad	4500	Tn/m ²

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIV. **Diseño de la rigidez efectiva total de todos los aisladores**

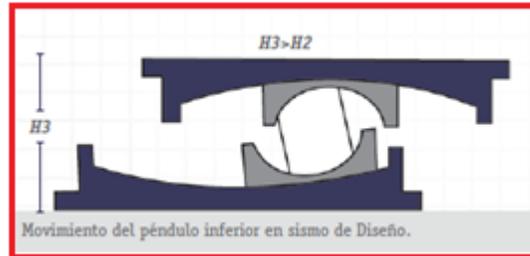
Rigidez efectiva de los aisladores total:		
rigidez lateral de cada aislador	419.03	Tn/m
BD o BM	1.39	
S1D Aceleración max. MCE	0.63	
S1R Aceleración Frecuente	0.63	
Desplazamiento de diseño (DD)	0.227284643	m
radio de curvatura (r)	0.954595499	m
amortiguamiento β_{eff}	9.156838327	%
BD o BM corregido	1.17470515	
Desplazamiento de diseño (DS) final	0.261201092	m
Rigidez efectiva del sistema keff:	1773.67824	Tn/m
Rigidez efectiva keff en cada aislador:	49.26884001	Tn/m
Rigidez vertical asumimos 70 veces la horizontal:	3448.8188	Tn/m
Rigidez post - fluencia del Sistema		
k2	1,377.80	Tn/m
Rigidez inicial - elástica del sistema		
k1	23,262.99	Tn/m
Dy - desplazamiento elástico	0.00254	m
Fuerza Restauración		
Fy (fricción)	103.404	Tn
Periodo Efectivo		
T =	1.8307	seg
Rigidez post - fluencia del aislador		
k2	38.27220398	Tn/m
Rigidez inicial - elástica del aislador		
k1	646.1942257	Tn/m
Ratio	0.059227091	

Fuente: elaboración propia.

4.1.9. **Diseño del aislador péndulo interior para sismos de diseño**

Se diseña el aislador a base de las fórmulas propuestas.

Figura 48. **Péndulo interior para sismos frecuentes**



Fuente: Constantinou, Aguilar, Morales y Caiza (2016). *Desempeño de aislador fpt8833/12-12/8-5 en el análisis sísmico del centro de investigaciones y de post grado de la UFA-ESPE.*

Tabla XXV. **Diseño del péndulo interior para sismos de diseño**

# aisladores	36 und
Peso de la estructura:	1477.2 Tn
Periodo fundamental sin aislación:	0.5 seg
Periodo objetivo TD:	1.96 seg
factor de resguardo	3
coeficiente fricción mínimo μ_{min} =	0.04
coeficiente fricción máx. μ_{max} =	0.07
resistencia teflón a tensión	4500 Tn/m ²
coeficiente de amortiguación β_d o β_m	15%
densidad material acero inoxidable	4500 Tn/m ²

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVI. **Diseño de la rigidez efectiva total de todos los aisladores en sismo de diseño**

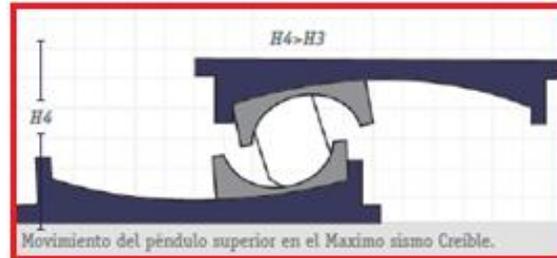
a) RIGIDEZ EFECTIVA DE LOS AISLADORES TOTAL:		
rigidez lateral de cada aislador	419.03	Tn/m
BD o BM	1.39	
S1D Aceleración max. MCE	0.63	
S1R Aceleración max. diseño	0.63	
Desplazamiento de diseño (DD)	0.220744077	m
radio de curvatura (r)	0.954595499	m
amortiguamiento β_{eff}	14.79310542	%
BD o BM corregido	1.343793163	
Desplazamiento de diseño (DD) final	0.228334446	m
Rigidez efectiva del sistema k_{eff} :	2000.323754	Tn/m
Rigidez efectiva k_{eff} en cada aislador:	55.56454873	Tn/m
Rigidez vertical asumimos 70 veces la horizontal:	3889.518411	Tn/m
Rigidez post - fluencia del Sistema		
k_2	1547.461728	Tn/m
Rigidez inicial - elástica del sistema		
k_1	40710.23622	Tn/m
Dy - desplazamiento elástico	0.00254	1130.8399
Fuerza Restauración		
Fy (fricción)	103.404	Tn
Periodo Efectivo		
T =	1.7239	seg
Rigidez post - fluencia del aislador		
k_2	42.98504799	Tn/m
Rigidez inicial - elástica del aislador		
k_1	1130.839895	Tn/m
Ratio	0.038011613	

Fuente: elaboración propia.

4.1.10. Diseño del aislador péndulo superior para sismo máximo creíble

Se diseña el aislador a base de las fórmulas propuestas.

Figura 49. **Péndulo superior para máximo sismo creíble**



Fuente: Constantinou, Aguilar, Morales y Caiza (2016). *Desempeño de aislador fpt8833/12-12/8-5 en el análisis sísmico del centro de investigaciones y de post grado de la UFA-ESPE.*

Tabla XXVII. **Diseño del péndulo superior para máximo sismo creíble**

# aisladores	36	und
Peso de la estructura:	1477.2	Tn
Periodo fundamental sin aislación:	0.5	seg
Periodo objetivo TD:	1.96	seg
factor de resguardo	3	
coeficiente fricción mínimo $\mu_{min} =$	0.04	
coeficiente fricción max $\mu_{max} =$	0.07	
resistencia teflón a tensión	4500	Tn/m ²
coeficiente de amortiguación β_d o β_m	15%	
densidad material acero inoxidable	4500	Tn/m ²

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVIII. **Diseño de la rigidez efectiva total de todos los aisladores en sismo máximo creíble**

RIGIDEZ EFECTIVA DE LOS AISLADORES TOTAL:		
rigidez lateral de cada aislador	419.03	Tn/m
BD o BM	1.39	
S1D Aceleración max. MCE	0.9450	
S1R Aceleración max. diseño	0.945	
Desplazamiento de diseño (DD)	0.331116116	m
radio de curvatura (r)	0.954595499	m
amortiguamiento β_{eff}	10.69008932	%
BD o BM corregido	1.22070268	
Desplazamiento de diseño (DD) final	0.377038085	m
Rigidez efectiva del sistema keff:	1821.715189	Tn/m
Rigidez efectiva keff en cada aislador:	50.6031997	Tn/m
Rigidez vertical asumimos 70 veces la horizontal:	3542.223979	Tn/m
Rigidez post - fluencia del Sistema		
k2	1547.461728	Tn/m
Rigidez inicial - elástica del sistema		
k1	40710.23622	Tn/m
Dy - desplazamiento elástico	0.00254	m
Fuerza Restauración		
Fy (fricción)	103.404	Tn
Periodo Efectivo		
T =	1.8064	seg
Rigidez post - fluencia del aislador		
k2	42.98504799	Tn/m
Rigidez inicial - elástica del aislador		
k1	1130.839895	Tn/m
Ratio	0.038011613	

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIX. Detalle del aislador FPT

DETALLES DE LOS AISLADORES FPT			
Área de contacto del deslizador:			
As=	0.08888889	m ²	
Diámetro de contacto de esta area:			
Ds=	0.34	m	
PENDULO EXTERIOR BOTTOM			
Desplazamiento Máximo MCE:			
BM=	1.34379316	coeficiente relacionado al amortiguamiento	
DM=	0.20086553	desplazamiento máximo para MCE	
TM=	1.72420957	periodo efectivo aislado	
kmin=	2000.32375	rigidez efectiva mínima	
W=	1477.2	peso	
Normativa ASCE	0.24103864	m 1.2* Dm	
Dimensión Horizontal Máxima			
Horizontal	0.35	m	
D2=DM+Ds:			
Carga Transmitida a la placa			
Ft	400	Tn	
Espesor de capa inferior			
pb=	1500	Tn/m ²	tensión admisible pb=15MPa
h=	0.13	m	espesor de placa
Altura de la placa de contacto con el deslizador			
H1=	0.14790252	m	
Altura de placa que contiene el deslizador			
H2=	0.10353176	m	
Altura libre entre las dos placas			
H3=	0.01585081	m	

Continuación de la tabla XXIX.

Altura de Anclaje			
H4=	0.04	m	
Altura Total			
Ht=	0.30728509	m	
Cálculo de la dimensión total			
Dexterior	0.04	m	min cada lado
Dt=	0.43	m	
Características:			
Numero de Aisladores	36	unidades	
Altura total		0.30728509	m
radio de curvatura		0.9545955	m
Diámetro total		0.43	m
Diámetro recorrido inferior	0.35	m	
área de contacto		0.08888889	m ²
Diámetro de contacto	0.34	m	
espesor de capa inferior	0.13	m	
Rigidez Horizontal cada aislador	55.5645487	Tn/m	
Rigidez Vertical sistema	3889.51841	Tn/m	
Coeficiente de fricción minino		0.04	
Coeficiente de fricción máximo		0.07	
Desplazamiento sistema diseño		0.22833445	m
Peso		1477.2	Tn
Periodo		1.72420957	Seg
N aisla		36	und

Continuación de la tabla XXIX.

Rigidez post fluencia k2		1547.46173	Tn/m
Fuerza fluencia		103.404	Tn
Desplaza lineal		0.00254	1130.8399
Rigidez inicial		40710.2362	Tn/m
Parámetro de ajuste		100	s/m
Energía disipada		2.62341056	Tn*m
Rigidez post fluencia en un aislador		42.985048	Tn/m
Fluencia en un aislador		2.87233333	Tn
Fuerza nula elástica		2.9046447	Tn
Rigidez inicial un aislador k1/#		1130.8399	Tn/m
Ω angular		3.64410458	rad/seg
Amortiguamiento efectivo (c)		4.3952307	Tn*seg/m

Fuente: elaboración propia.

4.2. Caso 2

Se aplicará a un edificio hipotético ubicado en el municipio de Chiquimulilla, Santa Rosa, la edificación es un edificio educativo a la cual le corresponde la categoría IV de obras esenciales de acuerdo a la norma de la NSE-1 de (AGIES, 2018).

La cual se compone de una edificación de cuatro niveles más techo, conformada por una estructura de sistema de marcos resistente a momentos de ductilidad alta que forman el sistema sismorresistente del edificio. La losa será de tipo losa maciza, armadas en dos direcciones de 0.20 m de peralte incluyendo el techo.

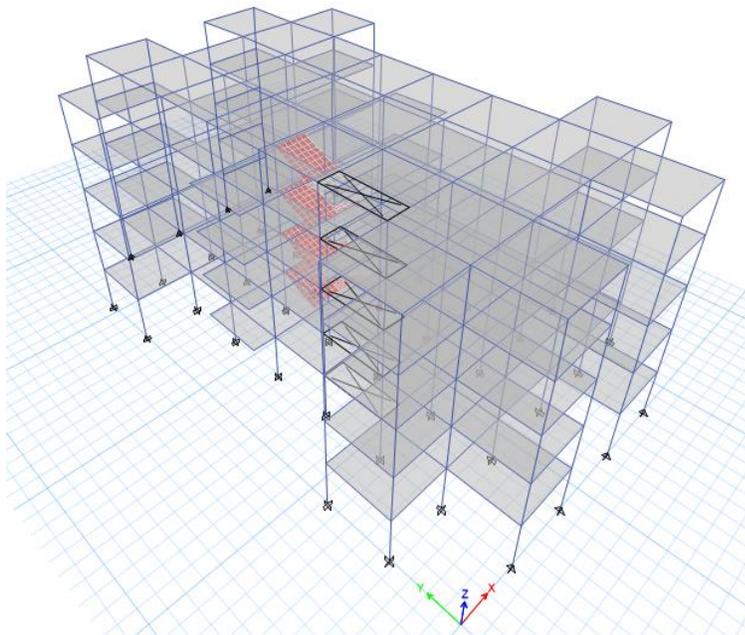
Las columnas en general serán de 0.65x0.65 m y de 0.60x0.60 m en los niveles, las vigas interiores y exteriores se han planteado con secciones de 0.40x0.75 m, 0.35x0.60 m y 0.40x0.65 m respectivamente.

La cimentación posibilita modelar como empotrados en los apoyos en la base de la composición. Además, se asumirá que las losas de concreto armado poseen la rigidez y resistencia suficiente para funcionar como diafragma rígido.

En la norma guatemalteca AGIES (2018) se considera el edificio educativo como una edificación esencial para el diseño se usará el factor de modificación de respuesta sísmica $R= 8$ un factor de incremento de resistencia $\Omega= 3$ y factor de incremento del desplazamiento elástico $Cd= 5.5$.

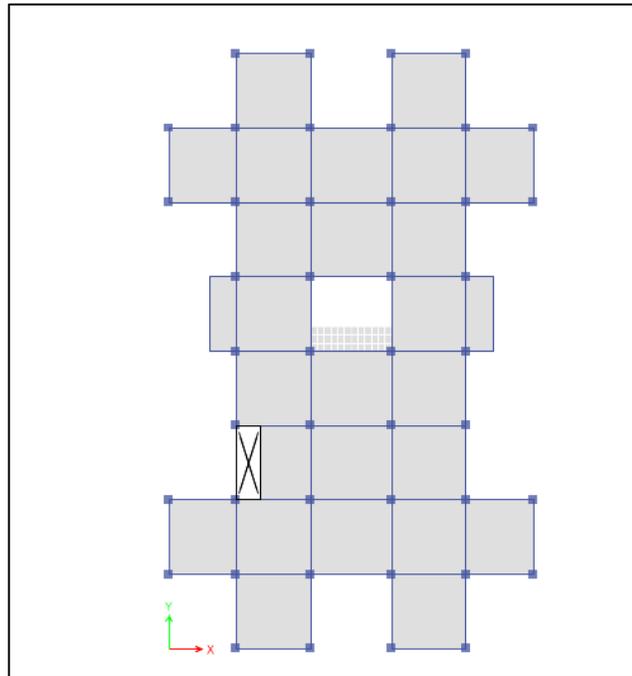
A continuación, se muestra el modelo de la distribución en planta, elevación y perspectiva 3D de la edificación.

Figura 50. **Vista en 3D del edificio educativo**



Fuente. Elaboración propia, realizado con software ETABS.

Figura 51. **Vista en elevación del edificio educativo**



Fuente: elaboración propia, realizado con software ETABS.

Se trabajará con el concreto reforzado para todos los elementos estructurales cuyas propiedades se muestran a continuación:

Tabla XXX. **Elementos estructurales del edificio educativo**

Concreto reforzado	
Resistencia concreto	$F'c = 280 \text{ kg/cm}^2$
Peso específico	$Ym = 2400 \text{ kg/cm}^3$
Módulo de elasticidad	$Ec = 2387519641.63 \text{ kg/m}^3$
Módulo de corte	$Gc = 94562;583 \text{ kg/cm}^2$
Módulo de poisson	$\nu = 0;15$
Resistencia fluencia del acero	$fy = 4200 \text{ kg/cm}^2$

Fuente: elaboración propia.

Las características y las cargas adoptadas al edificio son:

Tabla XXXI. **Características y las cargas adoptadas al edificio**

Sistema estructural	E-1
R	8
Sobre resistencia Ω	3
Cd	5.5
Clasificación de la obra	Esencial
Nivel de protección sísmica	E
Sismo de diseño	Extremo
Datos:	Edificio educativo 4 niveles + techo
Departamento:	Santa Rosa
Municipio:	Chiquimulilla
Ubicación	Chiquimulilla
Altura del edificio	20 metros
Carga viva según piso 1 a 3	400 KG/M2
Carga viva piso 4	400 KG/M2
Carga viva techo	150 KG/M2
Sobrecarga muerta piso 1 a 4	350 KG/M2
Sobrecarga muerta techo	150 KG/M2

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXII. **Datos para el espectro de respuesta del edificio educativo**

Ordenada espectral de periodo corto	Scr	1.78
Ordenada espectral con periodo de 1 segundo	S1r	1.19
Índice de sismicidad	Io	4.2
Clase de sitio	Cs	D
Tipo de fuente sísmica	Fuente	A
Distancia horizontal cercana a la fuente sísmica	Distancia	≥ 15 Km
Tipo de sismo	Sismo	Extremo
Periodo largo de transición	TL	3.86

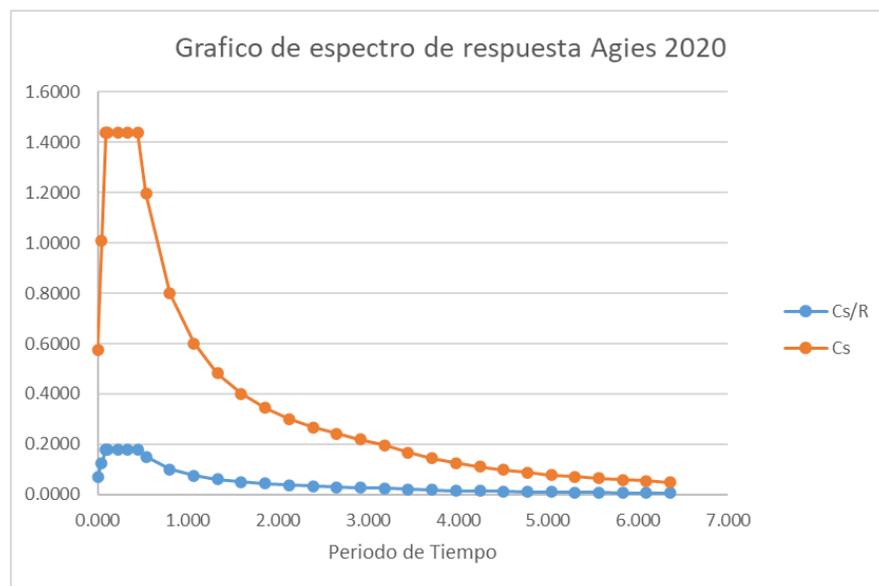
Clasificación de Sitio:	C
Fa:	1
Fv:	1
Na:	1
Nv:	1
Scs:	1.78
S1s:	1.19

Continuación de la tabla XXXII.

PERIODOS DE TRANCISION	
Ts:	0.668539326
To:	0.133707865
TL:	3.86
Kd:	1
Scd:	1.78
S1d:	1.19
Amsd	0.712

Fuente: elaboración propia.

Figura 52. **Espectro de respuesta Chiquimulilla, Santa Rosa**



Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXIII. **Datos para la obtención del espectro de respuesta del edificio educativo**

T [seg]	Sa(T)	Cs=Sa/R
0.0000	0.712	0.0890
0.1337	1.780	0.2225
0.4500	1.780	0.2225
0.5998	1.780	0.2225
0.6300	1.780	0.2225
0.6400	1.780	0.2225
0.6500	1.780	0.2225
0.6685	1.780	0.2225
0.7000	1.700	0.2125
1.5000	0.793	0.0992
2.0000	0.595	0.0744
3.8600	0.308	0.0385
3.9000	0.302	0.0377
4.0000	0.287	0.0359
4.5000	0.227	0.0284
5.0000	0.184	0.0230
5.5000	0.152	0.0190

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXIV. **Datos para la obtención del Ta, Cs del edificio educativo**

Kt=	0.047	AGIES
x=	0.85	AGIES
H=	20 m	Altura del edificio
Ta=	0.599754278	segundos Período empírico para iniciar calibración
Cs=	0.2225	AGIES

Fuente: elaboración propia.

Se utilizará la misma combinación de carga del edificio del hospital para fines prácticos. Se utilizará los mismos registros sísmicos del edificio del hospital.

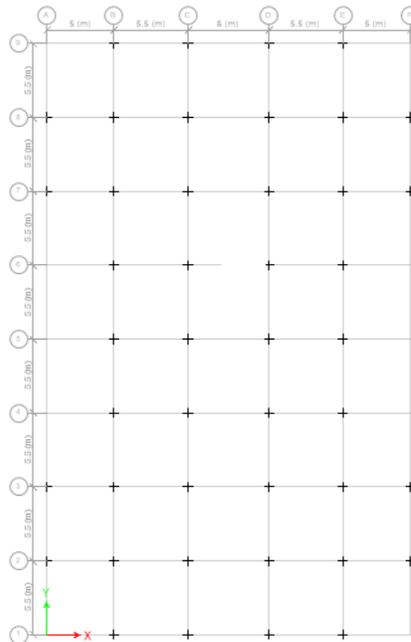
Tabla XXXV. **Modos de vibración del edificio educativo**

Case	Modo	Periodo seg
Modal-Ritz	1	0.794
Modal-Ritz	2	0.731
Modal-Ritz	3	0.686
Modal-Ritz	4	0.255
Modal-Ritz	5	0.233
Modal-Ritz	6	0.230
Modal-Ritz	7	0.140
Modal-Ritz	8	0.132

Fuente: elaboración propia.

La ubicación de los aisladores se dará en esta forma.

Figura 53. **Ubicación de los aisladores FPT en el proyecto del hospital**



Fuente: elaboración propia, realizado don software ETABS.

Se hace el cálculo del método estático equivalente y queda de esta forma.

Tabla XXXVI. **Procedimiento para fuerza lateral equivalente del edificio educativo**

Procedimiento para Estimar la Fuerza Lateral			
Fs=C _s x W			
F _s =	857.026	T _n	Cortante máximo
C _s =	0.223		Coefficiente sísmico
W=	3851.800	T _n	Peso sísmico de la Estructura

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXVII. **Procedimiento C_s de no superar los límites establecidos de la norma (ASCE 7-16)**

Scr=	1.78
S1r=	1.19
T objetivo	2.38
Altura h =	20.00

Límites Superior:			
CS no debe superar los siguientes límites:			
Si: T ≤ TL			
	CS=	0.063	
	T	2.380	seg
	TL	2.89	seg
Si: T > TL			
	CS=	FALSO	
	T	2.380	seg
	TL	2.89	seg
Límite Inferior:			
CS no deberá ser menor a:			
	CS=	0.078	> 0.01

Continuación de la tabla XXXVII.

	CS=	0.112	
Por lo tanto:	CS=	0.112	0.040
Resumen:			
Fs=	429.716	Tn	Fuerza lateral equivalente para diseñar estructuras aisladas

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXVIII. **Procedimiento desplazamientos laterales mínimos de la norma (ASCE 7-16)**

DESPLAZAMIENTO LATERALES MÍNIMOS

Desplazamiento de Diseño DD:

DD=	0.23 m	=7.67	cm
g=	9.81 m/s ²		
S1D=	0.79		
TD=	1.779 seg		
BD=	1.500		
βD=	20		

Periodo Efectivo en desplazamiento de Diseño TD:

TD=	1.779 seg		
W=	3851.800 Tn	14493.608	KN
KDmin=	4898.589 Tn/m	48.055	KN/mm

Resumen:

DD=	23.378 Cm	Desplazamiento de diseño
------------	------------------	---------------------------------

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXIX. **Procedimiento desplazamientos laterales máximos de la norma (ASCE 7-16)**

Desplazamiento de Máximo DM:			
DM=	0.405	m	13.29 cm
S1D=	1.19		
TM=	2.055	seg	
BM=	1.500		
Periodo Efectivo para Desplazamiento máximo esperado TM:			
TM=	2.055	seg	
W=	3851.800	Tn	14493.608 KN
Kmmin	3669.295	Tn/m	35.996 KN/mm
g=	9.81	m/s ²	
Resumen:			
DM=	40.51	cm	Desplazamiento máximo

Fuente: elaboración propia.

Tabla XL. **Procedimiento desplazamiento total de diseño D_{tm} de la norma (ASCE 7-16)**

Desplazamiento Total para Diseño D_{TM} y para Máximo Esperado D_{TM}			
y=	820.51	cm	
b=	1500	cm	
d=	3000	cm	
e=	46.41	cm	-
DTD=	24.328	cm	
DTM=	42.164	cm	
Resumen:			
DTD=	24.328	cm	Desplazamiento total de diseño
DTM=	42.164	cm	Desplazamiento total máximo esperado

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLI. **Procedimiento fuerza lateral mínima subestructura (ASCE 7-16)**

Vb=	7188.51	kN	Vb/9.81=732.77	Tn
KDMAX=	30.749	KN/mm		
DD=	233.784	mm		
Vb=	732.773	Tn	Fuerza lateral mínima sub estructura por debajo s-a	

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLII. **Procedimiento fuerza lateral mínima superestructura (ASCE 7-16)**

Elementos estructurales de la superestructura por encima del sistema de aislamiento				
Vs=	3594.25	kN	Vs/9.81=366.38	Tn
KDMAX=	30.749	KN/mm		
DD=	233.78	mm		
RI=	2	Tabla ASCE 7-16		

Vs=	366.38	Tn	Fuerza lateral mínima superestructura
------------	---------------	-----------	--

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLIII. **Límites de cortante (ASCE 7-16)**

Límites del Cortante VS				
El cortante Vs no sera como menos que:				
Vs=	649.61	Tn		
Vs=	329.175	Tn		
Vs=	649.61	Tn	Fuerza lateral diseño	

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLIV. **Fuerza lateral de recuperación del aislador (ASCE 7-16)**

FUERZA LATERAL DE RECUPERACION EN EL SISTEMA DE AISLAMIENTO			
FLTD=	7480.50	kN	FLTD/9.81=762.50 Tn
KDMAX=	30.749	KN/mm	
DTD=	243.280	mm	
Resumen:			
FREC MIN=	Ws*0.025=	Tn	
	96.295		
FREC MAX=	0.5*FLTD=	Tn	
	381.269		

Fuente: elaboración propia.

4.2.1. **Diseño del aislador péndulo interior**

Las propiedades del diseño de aislador del péndulo interior, se realizó con las ecuaciones dadas y se obtiene los siguientes datos:

Tabla XLV. **Diseño del péndulo interior para sismos frecuentes**

# aisladores	44	unidades
Peso de la estructura:	3851.8	Tn
Periodo fundamental sin aislación:	0.79	seg
Periodo objetivo TS:	2.38	seg
factor de resguardo	2	
<hr/>		
coeficiente fricción mínimo μ_{min} =	0.04	
coeficiente fricción max μ_{max} =	0.07	
resistencia teflón a tensión	4500	Tn/m ²
coeficiente de amortiguación β_d o β_m	15%	
densidad	4500	Tn/m ²

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLVI. **Diseño de la rigidez efectiva total de todos los aisladores**

RIGIDEZ EFECTIVA DE LOS AISLADORES TOTAL:			
rigidez lateral de cada aislador		568.37	Tn/m
BD o BM		1.35	
S1D Aceleración máx. MCE		1.78	
S1R Aceleración Frecuente		1.19	
Desplazamiento de diseño (DD)		0.5213	m
radio de curvatura (r)		1.4075	m
amortiguamiento β_{eff}		6.2053	%
BD o BM corregido		1.0861	
Desplazamiento de diseño (DS) final		0.6479	m
Rigidez efectiva del sistema k_{eff} :		2974.73	Tn/m
Rigidez efectiva k_{eff} en cada aislador:		67.59	Tn/m
Rigidez vertical asumimos 70 veces la horizontal:		4731.88	Tn/m
Rigidez post - fluencia del Sistema			
k_2		2,558.21	Tn/m
Rigidez inicial - elástica del sistema			
k_1		60,658.27	Tn/m
Dy - desplazamiento elástico		0.00254	m
Fuerza Restauración			
Fy (fricción)		269.626	Tn
Periodo Efectivo			
T =		2.2829	seg
Rigidez post - fluencia del aislador			
k_2		58.14	Tn/m
Rigidez inicial - elástica del aislador			
k_1		1,378.59	Tn/m
Ratio		0.0421	

Fuente: elaboración propia.

4.2.2. **Diseño del aislador péndulo interior para sismos de diseño**

Las propiedades del diseño del aislador del péndulo interior para sismo de diseño se realizó las ecuaciones y se obtiene los siguientes datos:

Tabla XLVII. **Diseño del péndulo interior para sismos de diseño**

# aisladores	44	und
Peso de la estructura:	3851.8	Tn
Periodo fundamental sin aislación:	0.79	seg
Periodo objetivo TD:	2.38	seg
factor de resguardo	3	
coeficiente fricción mínimo μ_{\min} =	0.04	
coeficiente fricción máx. μ_{\max} =	0.07	
resistencia teflón a tensión	4500	Tn/m ²
coeficiente de amortiguación β_d o β_m	15%	
densidad material acero inoxidable	4500	Tn/m ²

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLVIII. **Diseño de la rigidez efectiva total de todos los aisladores en sismo de diseño**

a) Rigidez efectiva de los aisladores total:		
rigidez lateral de cada aislador	568.37	Tn/m
BD o BM	1.39	
S1D Aceleración máx. MCE	1.19	
S1R Aceleración máx. diseño	1.19	
Desplazamiento de diseño (DD)	0.5063	m
radio de curvatura (r)	1.4075	m
amortiguamiento β_{eff}	10.3704	%
BD o BM corregido	1.2111	
Desplazamiento de diseño (DD) final	0.5810	m
Rigidez efectiva del sistema k_{eff} :	3200.54	Tn/m
Rigidez efectiva k_{eff} en cada aislador:	72.73	Tn/m
Rigidez vertical asumimos 70 veces la horizontal:	5091.77	Tn/m
Rigidez post - fluencia del Sistema		
k_2	2736.44	Tn/m
Rigidez inicial - elástica del sistema		
k_1	106151.96	Tn/m
Dy - desplazamiento elástico	0.00254	1130.8399
Fuerza Restauración		
Fy (fricción)	269.62	Tn
Periodo Efectivo		
T =	2.20	seg
Rigidez post - fluencia del aislador		
k_2	62.194	Tn/m
Rigidez inicial - elástica del aislador		
k_1	2412.54	Tn/m
Ratio	0.02577	

Fuente: elaboración propia.

4.2.3. Diseño del aislador péndulo superior para sismo máximo creíble

De igual manera las propiedades del diseño del aislador del péndulo superior se obtiene los siguientes datos:

Tabla XLIX. **Diseño del péndulo superior para máximo sismo creíble**

# aisladores	44	und
Peso de la estructura:	3851.88	Tn
Periodo fundamental sin aislación:	0.79	seg
Periodo objetivo TD:	2.38	seg
factor de resguardo	3	
coeficiente fricción mínimo $\mu_{min} =$	0.04	
coeficiente fricción máx. $\mu_{máx} =$	0.07	
resistencia teflón a tensión	4500	Tn/m ²
coeficiente de amortiguación β_d o β_m	15%	
densidad material acero inoxidable	4500	Tn/m ²

Fuente: elaboración propia.

Tabla L. **Diseño de la rigidez efectiva total de todos los aisladores en sismo máximo creíble**

RIGIDEZ EFECTIVA DE LOS AISLADORES TOTAL:		
rigidez lateral de cada aislador	568.37	Tn/m
BD o BM	1.39	
S1D Aceleración máx. MCE	1.7851	
S1R Aceleración máx. diseño	1.785	
Desplazamiento de diseño (DD)	0.7594	m
radio de curvatura (r)	1.4075	m
amortiguamiento β_{eff}	7.3106	%
BD o BM corregido	1.1193	
Desplazamiento de diseño (DD) final	0.9431	m
Rigidez efectiva del sistema k_{eff} :	3022.43	Tn/m
Rigidez efectiva k_{eff} en cada aislador:	68.69	Tn/m
Rigidez vertical asumimos 70 veces la horizontal:	4808.42	Tn/m

Continuación de la tabla L.

Rigidez post - fluencia del Sistema		
k2	2736.54	Tn/m
Rigidez inicial - elástica del sistema		
k1	106151.96	Tn/m
Dy - desplazamiento elástico	0.00254	m
Fuerza Restauración		
Fy (fricción)	269.62	Tn
Periodo Efectivo		
T =	2.25	seg
Rigidez post - fluencia del aislador		
k2	62.19	Tn/m
Rigidez inicial - elástica del aislador		
k1	2412.54	Tn/m
Ratio	0.02577	

Fuente: elaboración propia.

Tabla LI. **Detalle del aislador FPT**

DETALLES DE LOS AISLADORES FPT			
Área de contacto del deslizador:			
As=	0.1777	m2	
Diámetro de contacto de esta área:			
Ds=	0.48	m	
PENDULO EXTERIOR BOTTOM			
Desplazamiento Máximo MCE:			
BM=	1.2111	coeficiente relacionado al amortiguamiento	
DM=	0.5374	desplazamiento máximo para MCE	
TM=	2.2011	periodo efectivo aislado	
kmin=	3200.54	rigidez efectiva mínima	
W=	3851.80	peso	
Normativa ASCE	0.6448	m	1.2* Dm
Dimensión Horizontal Máxima			

Continuación de la tabla LI.

Horizontal	0.67	m	
D2=DM+Ds:			
Carga Trasmitida a la placa			
Ft	800	Tn	
Espesor de capa inferior			
pb=	1500	Tn/m ²	tensión admisible pb=15MPa
h=	0.12	m	espesor de placa
Altura de la placa de contacto con el deslizador			
H1=	0.16070	m	
Altura de placa que contiene el deslizador			
H2=	0.1125	m	
Altura libre entre las dos placas			
H3=	0.04074	m	
Altura de Anclaje			
H4=	0.04	m	
Altura Total			
Ht=	0.3539	m	
Cálculo de la dimensión total			
Dexterior	0.04	m	min cada lado
Dt=	0.75	m	
Características:			
Numero de	44 unidades		
Aisladores			
Altura total	0.3539 m		
radio de curvatura	1.4075 m		
Diámetro total	0.75 m		

Continuación de la tabla LI.

Diámetro recorrido inferior		0.67	m
área de contacto		0.1777	m ²
Diámetro de contacto		0.48	M
espesor de capa inferior		0.12	m
Rigidez Horizontal cada aislador		72.7396	Tn/m
Rigidez Vertical sistema		5091.73	Tn/m

Coeficiente de fricción mínimo		0.04	
Coeficiente de fricción máximo		0.07	
Desplazamiento sistema diseño		0.5810	m
Peso		3851.80	Tn

Periodo		2.20	Seg
---------	--	------	-----

N AISLA		44	und
---------	--	----	-----

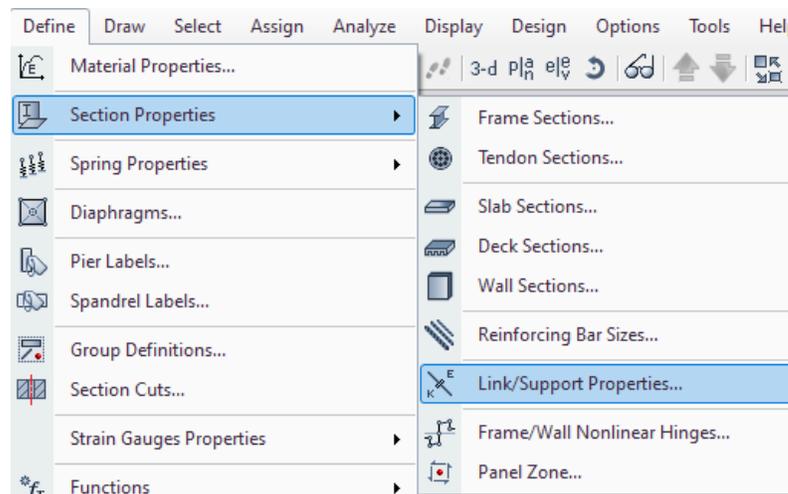
Rigidez post fluencia k2		2736.40	Tn/m
Fuerza Fluencia		269.625	Tn
desplaza lineal		0.00254	1130.8399
rigidez inicial		106151.99	Tn/m
parámetro de ajuste		100	s/m
Energía Disipada		14.24	Tn*m
Rigidez pos fluencia en un aislador		62.19	Tn/m
Fluencia en un aislador		6.12	Tn
Fuerza nula elástica		6.15	Tn
Rigidez inicial un aisla k1/#		2412.54	Tn/m
ω angular		2.8545	rad/seg
amortiguamiento efectivo (c)		4.7036	Tn*seg/m

Fuente: elaboración propia.

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En primer lugar, se diseña el edificio en el programa ETABS después se establece el diseño de aislador en la pestaña link como se observa a continuación.

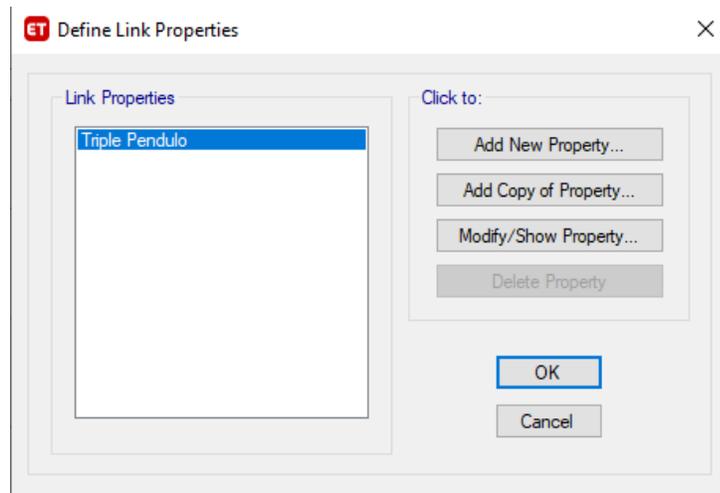
Figura 54. Ingreso para el diseño del aislador



Fuente: elaboración propia, realizado con el software ETABS.

Se define una nueva propiedad del diseño de aislación.

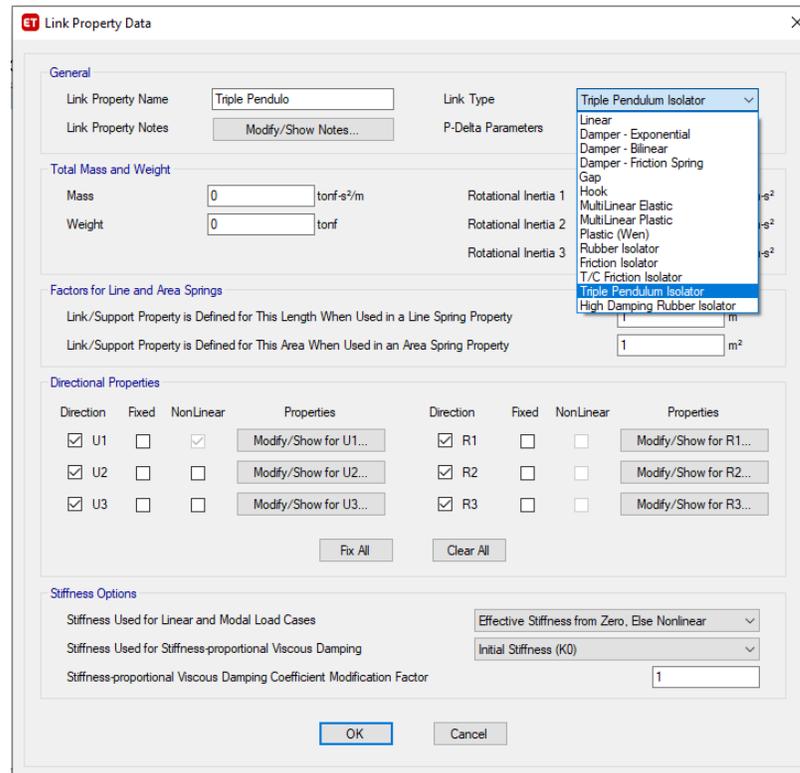
Figura 55. Definición del diseño del aislador



Fuente: elaboración propia, realizado con el software ETABS.

Después se ingresa el tipo de link que se va a trabajar, en este caso se trabajara un aislador triple péndulo para esta estructura como se indica en esta figura.

Figura 56. Definición del diseño del aislador triple péndulo



Fuente: elaboración propia, realizado con el software ETABS.

Después se ingresa en las propiedades direccionales, para ya ingresar los datos para el diseño del aislador.

Figura 57. **Propiedades direccionales**

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

Fuente: elaboración propia, realizado con el software ETABS.

En la primera dirección se ingresa la rigidez vertical y el amortiguamiento, como se propuso en el diseño.

Figura 58. **Ingreso de datos de diseño en la dirección uno del aislador del hospital**

ET Link/Support Directional Properties

Identification

Property Name: Triple Pendulo

Direction: U1

Type: Triple Pendulum Isolator

NonLinear: Yes

Linear Properties

Effective Stiffness: 3889.51841 tonf/m

Effective Damping: 4.395230 tonf-s/m

Nonlinear Properties

Stiffness: 3889.51841 tonf/m

Damping Coefficient: 0 tonf-s/m

OK Cancel

Fuente: elaboración propia, realizado con el software ETABS.

Figura 59. **Ingreso de datos de diseño en la dirección uno del aislador de proyecto de escuela**

Identification	
Property Name	Triple Pendulo
Direction	U1
Type	Triple Pendulum Isolator
NonLinear	Yes

Linear Properties	
Effective Stiffness	5091.77 kgf/m
Effective Damping	4.70 kgf-s/m

Nonlinear Properties	
Stiffness	5091.77 kgf/m
Damping Coefficient	0 kgf-s/m

Fuente: elaboración propia, realizado con el software ETABS.

En la segunda y tercera dirección, se ingresa los datos propuestos para el diseño resumidos en la siguiente tabla como se propuso en los diseños anteriores.

Tabla LII. **Datos de diseño dirección 2 y 3 de proyecto para el Hospital**

Péndulo Interior			
kmin=	2000.32375	Tn/m	rigidez efectiva mínima
Altura de la placa de contacto con el deslizador			
H1=	0.14790252	m	0.15 m
Altura de placa que contiene el deslizador			
H2=	0.10353176	m	0.1 m
Rigidez inicial – Elástica del aislador			
k1	646.194226	Tn/m	
Ratio	0.05922709		
radio de curvatura		0.9545955	m
Desplazamiento de diseño (DS) final			0.26120109 m
Péndulo de diseño			
Rigidez inicial – Elástica del aislador			
k1	1130.8399	Tn/m	
Ratio	0.03801161		
radio de curvatura		0.9545955	m
Desplazamiento de diseño (DD) final			0.22833445 m
Péndulo superior			
Rigidez inicial – Elástica del aislador			
k1	1130.8399	Tn/m	
Ratio	0.03801161		
radio de curvatura		0.9545955	m
Desplazamiento de diseño (DD) final			0.37703809 m

Fuente: elaboración propia.

Tabla LIII. **Datos de diseño dirección 2 y 3 de proyecto para la escuela**

Péndulo Interior			
kmin=	2000.32375	Tn/m	rigidez efectiva mínima
Altura de la placa de contacto con el deslizador			
H1=	0.16070722	m	0.15 m
Altura de placa que contiene el deslizador			
H2=	0.11249505	m	0.1 m
Rigidez inicial - elástica del aislador			
k1	1378.59699	Tn/m	
Ratio	0.04217406		
radio de curvatura (r)		1.40754132	m
Desplazamiento de diseño (DS) final			0.64794434 m
Péndulo de diseño			
Rigidez inicial - elástica del aislador			

Continuación de la tabla LIII:

k1	2412.54474	Tn/m
Ratio	0.0257795	
radio de curvatura (r)	1.40754132	m
Desplazamiento de diseño (DD) final	0.58109327	m
Péndulo superior		
Rigidez inicial - elástica del aislador		
k1	2412.54474	Tn/m
Ratio	0.0257795	
radio de curvatura (r)	1.40754132	m
Desplazamiento de diseño (DD) final	0.94312356	m

Fuente: elaboración propia.

Figura 60. Ingreso de datos de diseño en la dirección dos y tres del proyecto de hospital

Link/Support Directional Properties

Identification

Property Name: Triple Pendulo Type: Triple Pendulum Isolator

Direction: U2; U3 NonLinear: Yes

Linear Properties

Effective Stiffness - U2: 2000.32 tonf/m Effective Stiffness - U3: 2000.32 tonf/m

Effective Damping - U2: 0 tonf-s/m Effective Damping - U3: 0 tonf-s/m

Shear Deformation Location

Distance from End-J - U2: 0 m Distance from End-J - U3: 0 m

Height and Symmetry of Sliding Surfaces

Height for Outer Surfaces: 0.15 m Outer Bottom Surface is Symmetric to Outer Top Surface

Height for Inner Surfaces: 0.10 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	1130.8399	1130.8399	646.19	646.19	tonf/m
Friction Coefficient, Slow	0.04	0.04	0.04	0.04	
Friction Coefficient, Fast	0.07	0.07	0.07	0.07	
Rate Parameter	0.038011	0.038011	0.059227	0.059227	sec/m
Radius of Sliding Surface	0.9545	0.9545	0.9545	0.9545	m
Stop Distance	0.3770	0.2283	0.2612	0.2612	m

OK Cancel

Fuente: elaboración propia, realizado con software ETABS.

Figura 61. Ingreso de datos de diseño en la dirección dos y tres del proyecto de la escuela

ET Link/Support Directional Properties

Identification

Property Name: Triple Pendulo Type: Triple Pendulum Isolator
 Direction: U2; U3 NonLinear: Yes

Linear Properties

Effective Stiffness - U2: 2000.32 kgf/m Effective Stiffness - U3: 2000.32 kgf/m
 Effective Damping - U2: 0 kgf-s/m Effective Damping - U3: 0 kgf-s/m

Shear Deformation Location

Distance from End-J - U2: 0 m Distance from End-J - U3: 0 m

Height and Symmetry of Sliding Surfaces

Height for Outer Surfaces: 0.15 m Outer Bottom Surface is Symmetric to Outer Top Surface
 Height for Inner Surfaces: 0.10 m Inner Bottom Surface is Symmetric to Inner Top Surface

Nonlinear Properties for Directions U2 and U3

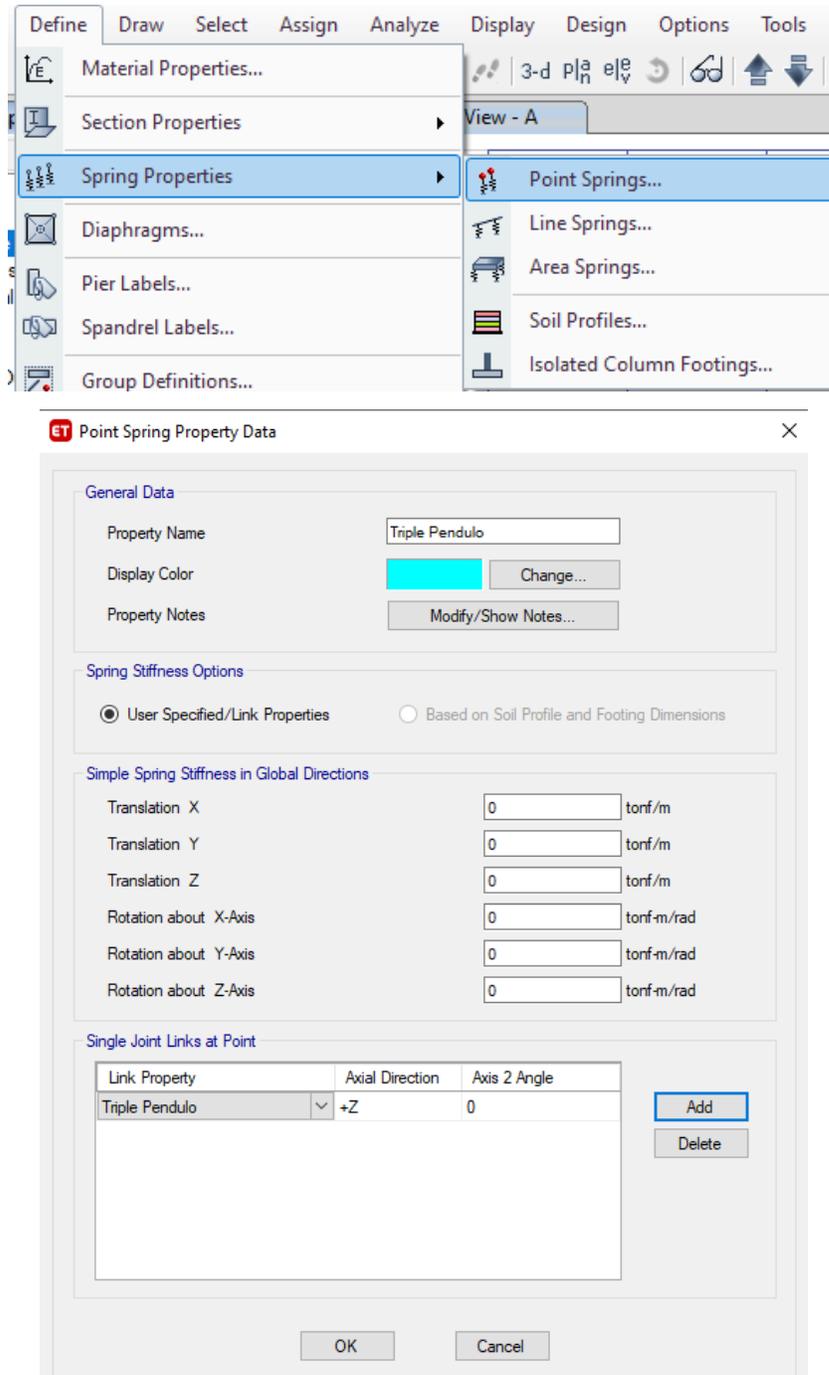
	Outer Top	Outer Bottom	Inner Top	Inner Bottom	
Stiffness	2412.54	2412.54	1378.59	1378.59	kgf/m
Friction Coefficient, Slow	0.04	0.04	0.04	0.04	
Friction Coefficient, Fast	0.07	0.07	0.07	0.07	
Rate Parameter	0.02577	0.02577	0.04217	0.04217	sec/m
Radius of Sliding Surface	1.4075	1.4075	1.4075	1.4075	m
Stop Distance	0.9431	0.5810	0.6479	0.6479	m

OK Cancel

Fuente: elaboración propia, realizado con software ETABS.

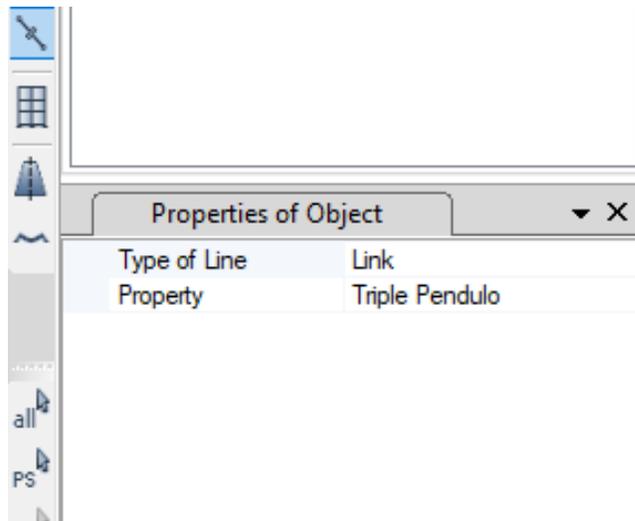
Después del ingreso de diseño del aislador, se procede a dibujar hay dos formas de hacerlo la primera es definiendo como un resorte el aislador y la segunda se hace dibujado los links como se observa en la figura.

Figura 62. Forma para dibujar el aislador tipo *springs*



Fuente: elaboración propia, realizado con software ETABS.

Figura 63. **Forma para dibujar el aislador tipo link**



Fuente: elaboración propia, realizado con software ETABS.

Primero se hace el análisis modal espectral, porque consiste como estará la estructura en vibración libre, y ayuda a obtener los periodos y las masas participativas y se utilizará el caso de los vectores modal-ritz como se observa en la figura.

Figura 64. Ingreso de datos para vectores modal-ritz

Modal Case Data

General

Modal Case Name: Modal-Ritz [Design...]

Modal Case SubType: Ritz [Notes...]

Exclude Objects in this Group: Not Applicable

Mass Source: Masa

P-Delta/Nonlinear Stiffness

Use Preset P-Delta Settings: None [Modify/Show...]

Use Nonlinear Case (Loads at End of Case NOT Included)

Nonlinear Case: []

Loads Applied

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

[Add] [Delete]

Other Parameters

Maximum Number of Modes: 15

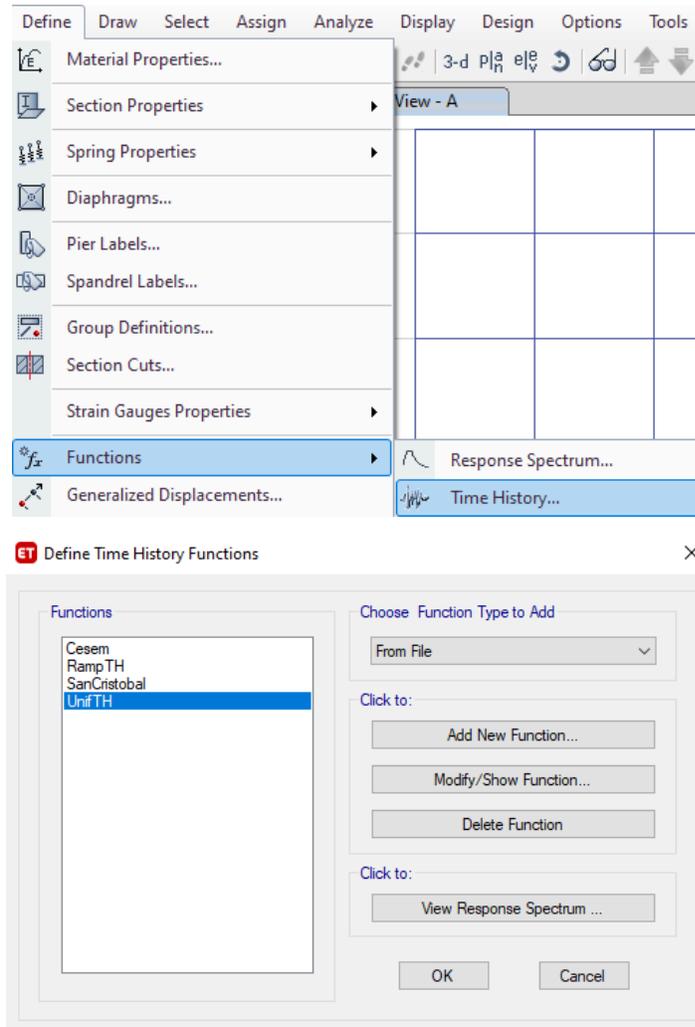
Minimum Number of Modes: 1

[OK] [Cancel]

Fuente: elaboración propia, realizado con software ETABS.

Se define las funciones de historia de tiempo para el proyecto según las imágenes

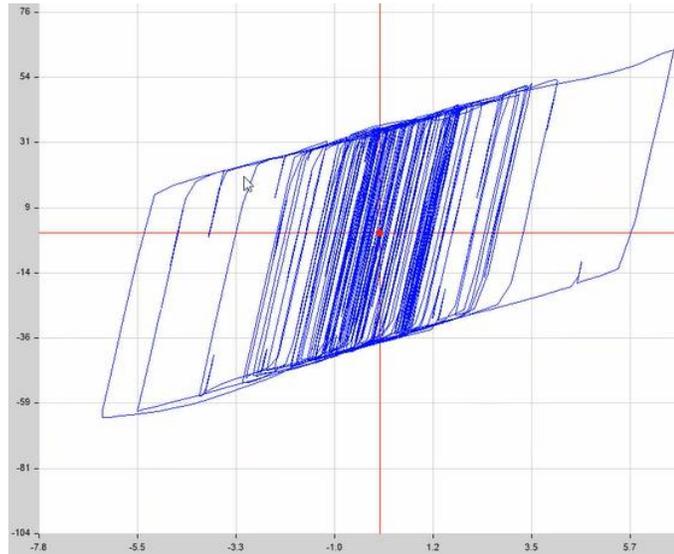
Figura 65. Ingreso de datos para historia de tiempo



Fuente: elaboración propia, realizado con software ETABS.

Se determina los resultados a continuación, con el análisis historia de tiempo donde se puede estudiar el comportamiento resolviendo la ecuación completa de la dinámica y estudia punto a punto de la estructura, y se estudia en componente no lineal del edificio propuesto con su curva de la histéresis.

Figura 66. **Curva de la histéresis de los aisladores en el proyecto de hospital**



Fuente: elaboración propia, realizado con software ETABS.

Figura 67. **Curva de la histéresis de los aisladores en el proyecto de la escuela**



Fuente: elaboración propia, realizado con software ETABS.

5.1. Edificio sin aisladores

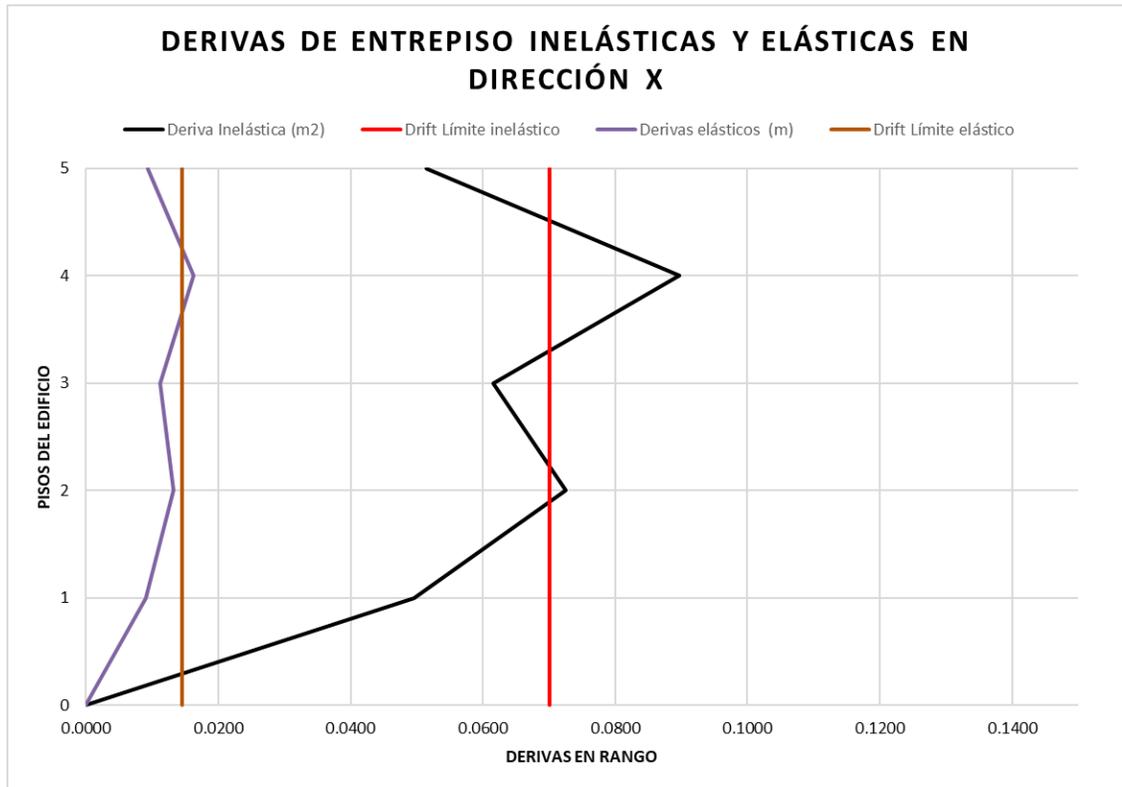
Las derivas de la estructura sin disipadores, conseguidas por medio de un estudio no lineal historia de tiempo de los dos registros sísmicos que se explica en este trabajo se presentan en la tabla dada a continuación. Dichos resultados se toman como punto de partida, para los posteriores estudios que se llevarán a cabo.

Tabla LIV. **Derivas de entrepiso en dirección X sin aisladores en la edificación del hospital utilizando línea de historia de la estación CESEM**

DIRECCIÓN X							
Piso	Altura (m)	Load Case	Desplazamiento Etabs (m)	Δ ultima Max (m)	Derivas elásticas X (m)	Deriva Inelástica (m2)	Verificación
Techo	3.50	SDX Max Cesem	0.059061	0.070	0.009352	0.051436	Cumple
4	3.50	SDX Max Cesem	0.049709	0.070	0.016305	0.089678	No cumple
3	3.50	SDX Max Cesem	0.033404	0.070	0.011189	0.061540	Cumple
2	3.50	SDX Max Cesem	0.022215	0.070	0.013189	0.072540	No cumple
1	3.50	SDX Max Cesem	0.009026	0.070	0.009026	0.049643	Cumple
Base	0.00	SDX Max Cesem	0.00000	0.00000	0.00000	0.0000	

Fuente: elaboración propia.

Figura 68. **Derivas de entrepiso en dirección X del proyecto del hospital utilizando línea de historia de la estación CESEM**



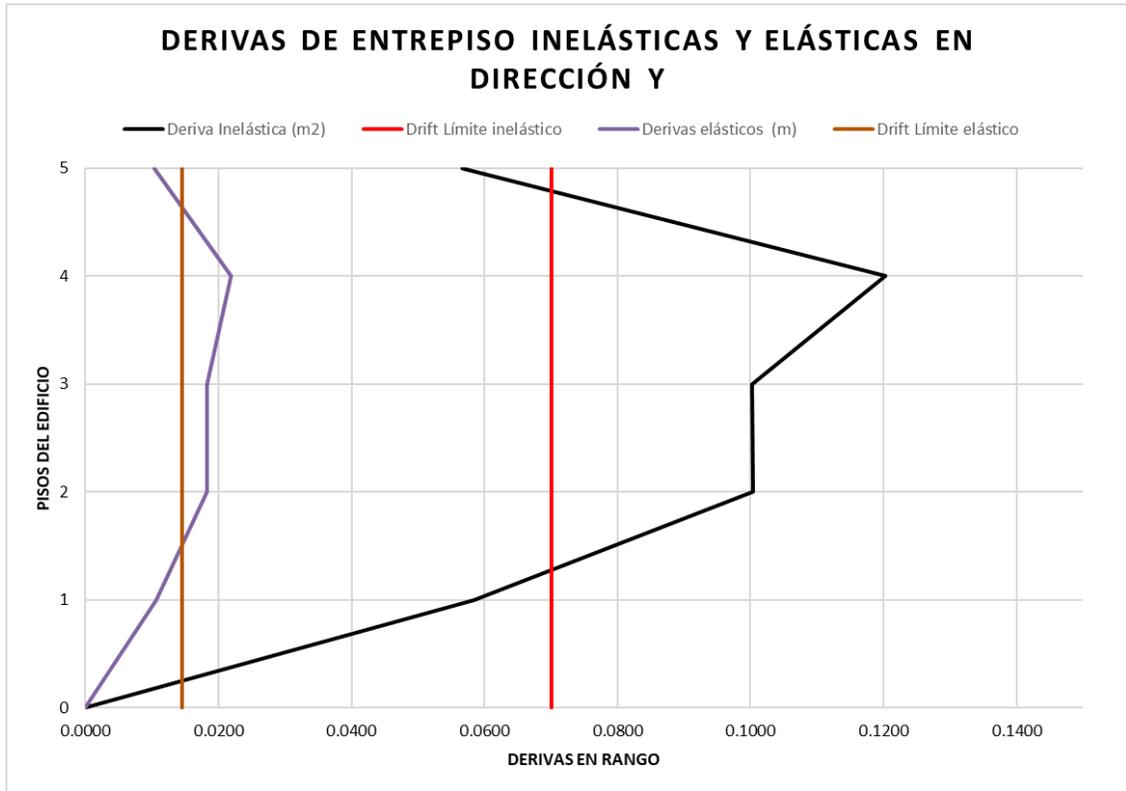
Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel 2021.

Tabla LV. **Derivas de entrepiso en dirección Y sin aisladores en la edificación del hospital utilizando línea de historia de la estación CESEM**

DIRECCIÓN Y							
Piso	Altura (m)	Load Case	Desplazamiento Etabs (m)	Δ ultima Max (m)	Derivas elásticas Y (m)	Deriva Inelástica (m2)	Verificación
Techo	3.50	SDY Max Cesem	0.079255	0.07000	0.010297	0.056634	Cumple
4	3.50	SDY Max Cesem	0.068958	0.07000	0.021872	0.120296	No cumple
3	3.50	SDY Max Cesem	0.047086	0.07000	0.018213	0.100172	No cumple
2	3.50	SDY Max Cesem	0.028873	0.07000	0.018247	0.100359	No cumple
1	3.50	SDY Max Cesem	0.010626	0.07000	0.010626	0.058443	Cumple
Base	0.00	SDY Max Cesem	0.00000	0.00000	0.00000	0.0000	

Fuente: elaboración propia.

Figura 69. **Derivas de entrepiso en dirección Y del proyecto del hospital utilizando línea de historia de la estación CESEM**



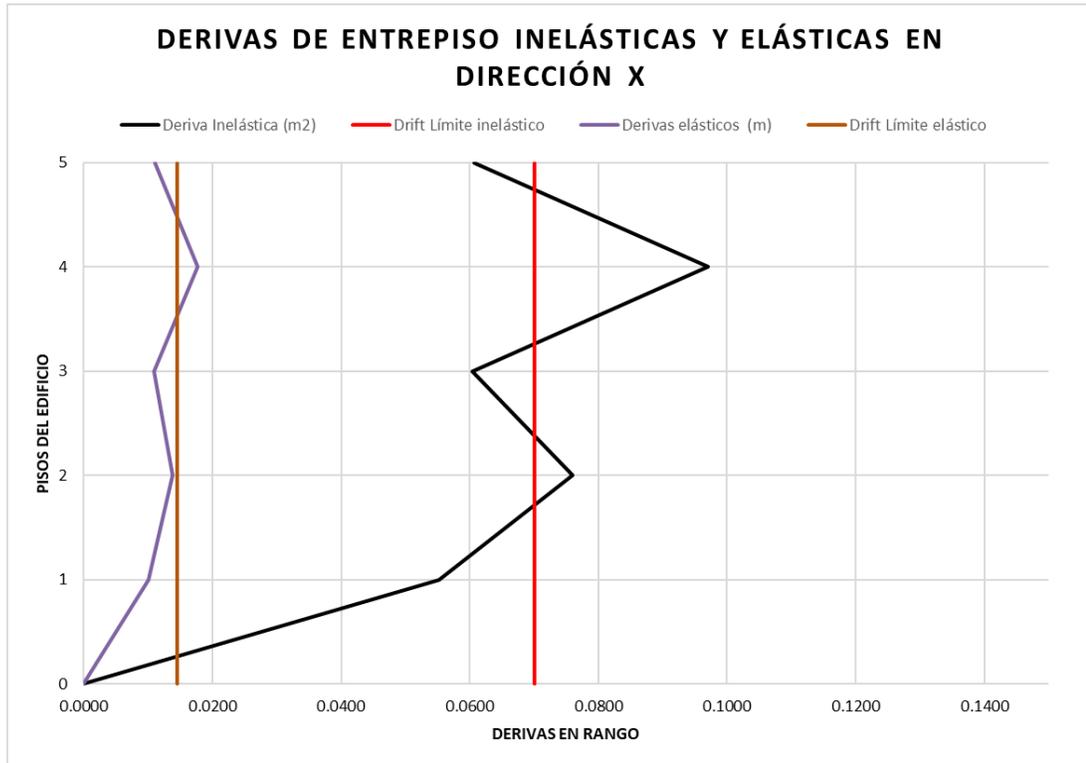
Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel 2021.

Tabla LVI. **Derivas de entrepiso en dirección X sin aisladores en la edificación del hospital utilizando línea de historia de la estación San Cristóbal**

DIRECCIÓN X							
Piso	Altura (m)	Load Case	Desplazamiento Etabs (m)	Δ ultima Max (m)	Derivas elásticas X (m)	Deriva Inelástica (m2)	Verificación
Techo	3.50	SDX Max Cristóbal	0.063531	0.070	0.011039	0.060715	Cumple
4	3.50	SDX Max Cristóbal	0.052492	0.070	0.017653	0.097092	No cumple
3	3.50	SDX Max Cristóbal	0.034839	0.070	0.010973	0.060352	Cumple
2	3.50	SDX Max Cristóbal	0.023866	0.070	0.013828	0.076054	No cumple
1	3.50	SDX Max Cristóbal	0.010038	0.070	0.010038	0.055209	Cumple
Base	0.00	SDX Max Cristóbal	0.00000	0.00000	0.00000	0.0000	

Fuente: elaboración propia.

Figura 70. Derivas de entrepiso en dirección X del proyecto del hospital utilizando línea de historia de la estación San Cristóbal



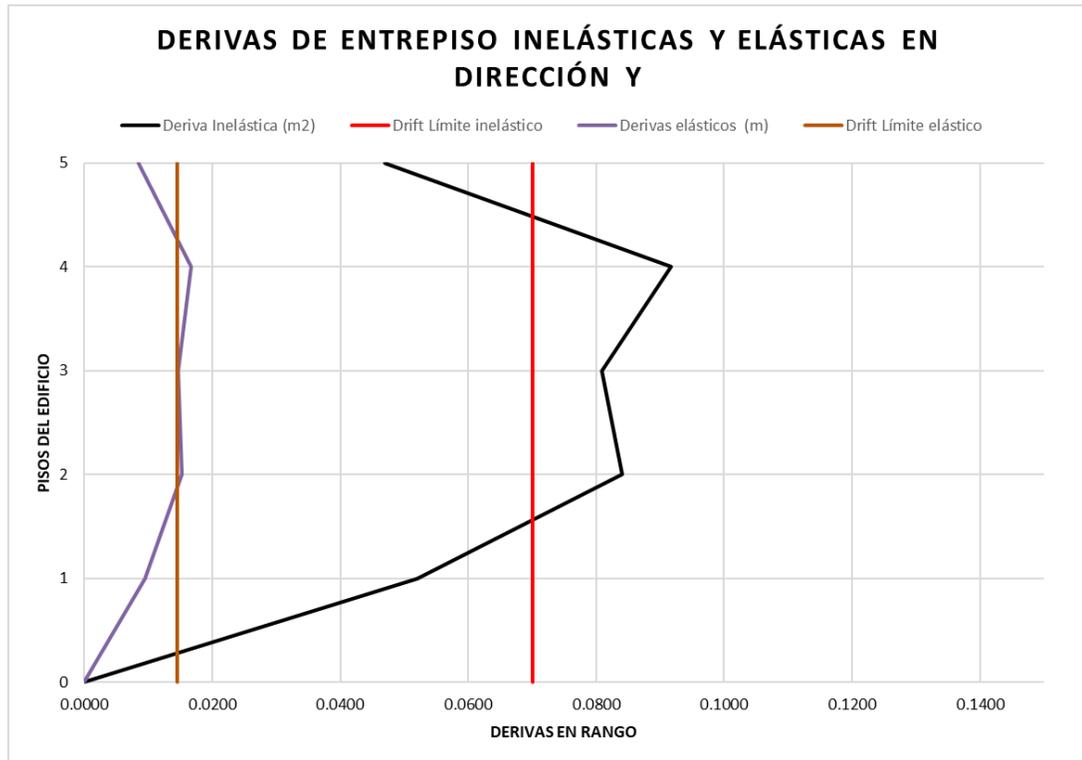
Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel 2021.

Tabla LVII. **Derivas de entrepiso en dirección Y sin aisladores en la edificación del hospital utilizando línea de historia de la estación San Cristóbal**

DIRECCIÓN Y							
Piso	Altura (m)	Load Case	Desplazamiento Étabs (m)	Δ ultima Max (m)	Derivas elásticas Y. (m)	Deriva Inelástica (m2)	Verificación
Techo	3.50	SDY Max Cristóbal	0.064668	0.07000	0.008541	0.046976	Cumple
4	3.50	SDY Max Cristóbal	0.056127	0.07000	0.016676	0.091718	No cumple
3	3.50	SDY Max Cristóbal	0.039451	0.07000	0.014717	0.080944	No cumple
2	3.50	SDY Max Cristóbal	0.024734	0.07000	0.015272	0.083996	No cumple
1	3.50	SDY Max Cristóbal	0.009462	0.07000	0.009462	0.052041	Cumple
Base	0.00	SDY Max Cristóbal	0.00000	0.00000	0.00000	0.0000	

Fuente: elaboración propia.

Figura 71. Derivas de entrepiso en dirección Y del proyecto del hospital utilizando línea de historia de la estación San Cristóbal



Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel 2021.

Figura 72. **Derivas de entrepiso en dirección X, Y del proyecto del hospital utilizando línea de historia de la estación CESEM**

	Story	Elevation m	Location	X-Dir m	Y-Dir m
▶	Techo	17.5	Top	0.059061	0.079255
	Piso 4	14	Top	0.049709	0.068958
	Piso 3	10.5	Top	0.033404	0.047086
	Piso 2	7	Top	0.022215	0.028873
	Piso1	3.5	Top	0.009026	0.010626
	Base	0	Top	0	0

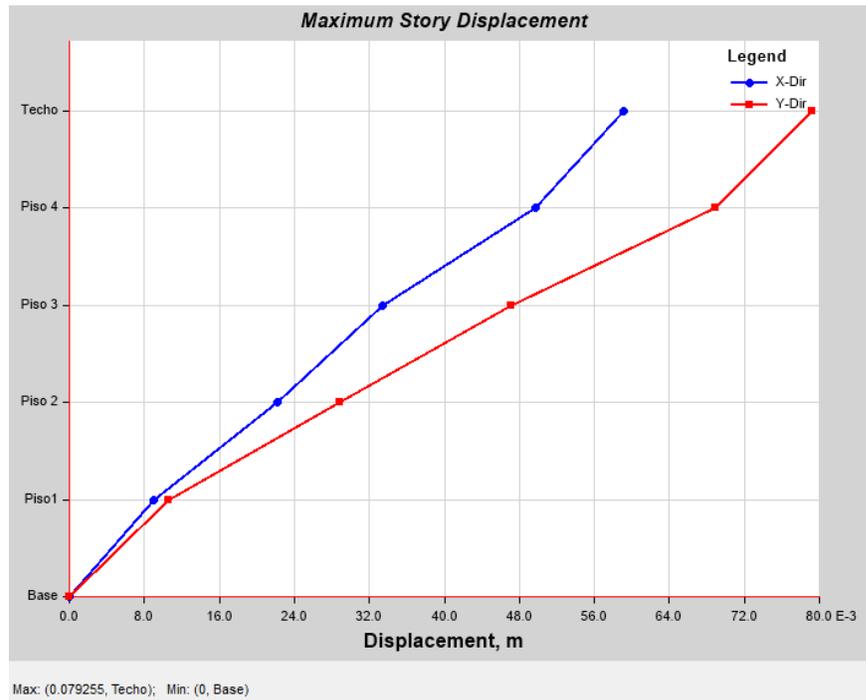
Fuente: elaboración propia, realizado con ETABS.

Figura 73. **Derivas de entrepiso en dirección X, Y del proyecto del hospital utilizando línea de historia de la estación San Cristóbal**

	Story	Elevation m	Location	X-Dir m	Y-Dir m
▶	Techo	17.5	Top	0.063531	0.064668
	Piso 4	14	Top	0.052492	0.056127
	Piso 3	10.5	Top	0.034839	0.039451
	Piso 2	7	Top	0.023866	0.024734
	Piso1	3.5	Top	0.010038	0.009462
	Base	0	Top	0	0

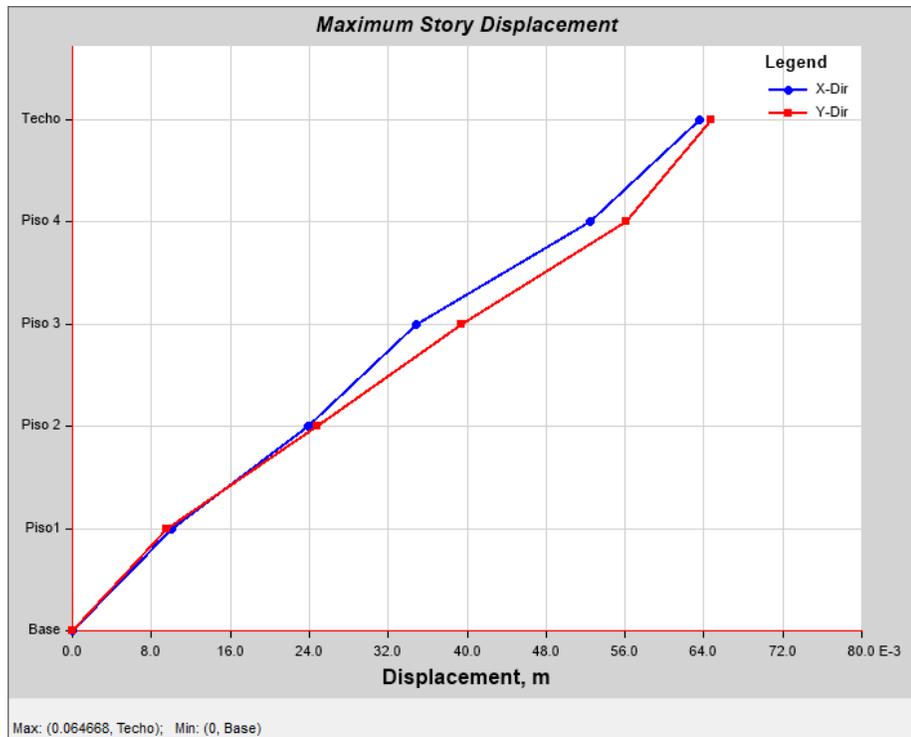
Fuente: elaboración propia, realizado con ETABS.

Figura 74. **Desplazamientos de entrepiso en dirección X, Y del proyecto del hospital utilizando línea de historia de la estación CESEM**



Fuente: elaboración propia, realizado con software ETABS.

Figura 75. **Desplazamientos de entrepiso en dirección X, Y del proyecto del hospital utilizando línea de historia de la estación San Cristóbal**



Fuente: elaboración propia, realizado con software ETABS.

Como se puede observar, las derivas son mayores que el límite de 0.020 de edificación en general predeterminado por AGIES. Las derivas máximas de piso no chequean en el primer nivel, en el sentido X, Y del edificio por la forma de diseño de la estructura, también influyen los elementos estructurales del edificio y las combinaciones de carga, que se propuso para este tipo de investigación y por el análisis historia de tiempo de los acelerogramas seleccionados, como se puede visualizar con facilidad en las figuras, que no posee un buen comportamiento en cuanto a las derivas elásticas e inelásticas en el sentido X, Y.

Tabla LVIII. **Derivas de entrepiso en dirección X sin aisladores en la edificación de la escuela utilizando línea de historia de la estación CESEM**

DIRECCIÓN X							
Piso	Altura (m)	Load Case	Desplazamiento Etabs (m)	Δ ultima Max (m)	Derivas elásticas X. (m)	Deriva Inelástica (m2)	Verificación
Techo	4.00	SDX Max Cesem	0.066853	0.08000	0.008261	0.045436	Cumple
4	4.00	SDX Max Cesem	0.058592	0.08000	0.011723	0.064477	Cumple
3	4.00	SDX Max Cesem	0.046869	0.08000	0.015923	0.087577	No cumple
2	4.00	SDX Max Cesem	0.030946	0.08000	0.018314	0.100727	No cumple
1	4.00	SDX Max Cesem	0.012632	0.08000	0.012632	0.069476	Cumple
Base	0.00	SDX Max Cesem	0.00000	0.08000	0.00000	0.0000	

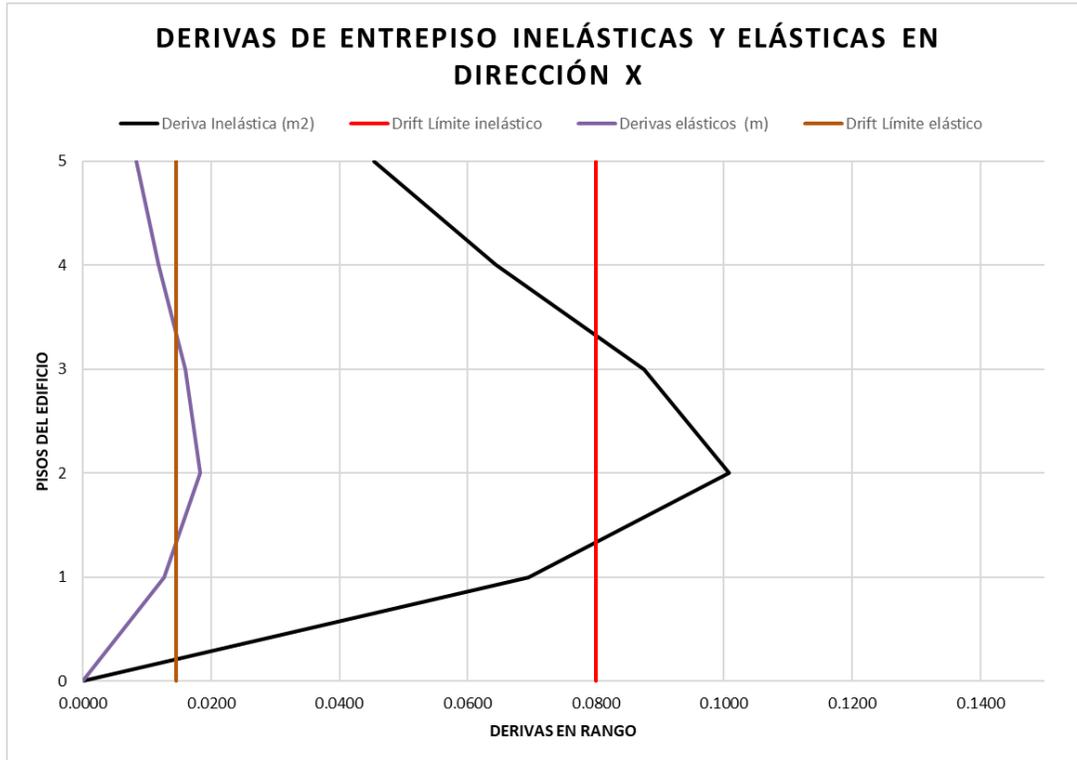
Fuente: elaboración propia.

Tabla LIX. **Derivas de entrepiso en dirección X sin aisladores en la edificación de la escuela utilizando línea de historia de la estación San Cristóbal**

DIRECCIÓN X							
Piso	Altura (m)	Load Case	Desplazamiento Etabs (m)	Δ ultima Max (m)	Derivas elásticas X. (m)	Deriva Inelástica (m2)	Verificación
Techo	4.00	SDX Max Cristóbal	0.060461	0.08000	0.008265	0.045458	Cumple
4	4.00	SDX Max Cristóbal	0.052196	0.08000	0.011294	0.062117	Cumple
3	4.00	SDX Max Cristóbal	0.040902	0.08000	0.014960	0.082280	No cumple
2	4.00	SDX Max Cristóbal	0.025942	0.08000	0.015933	0.087632	No cumple
1	4.00	SDX Max Cristóbal	0.010009	0.08000	0.010009	0.055050	Cumple
Base	0.00	SDX Max Cristóbal	0.00000	0.08000	0.00000	0.0000	

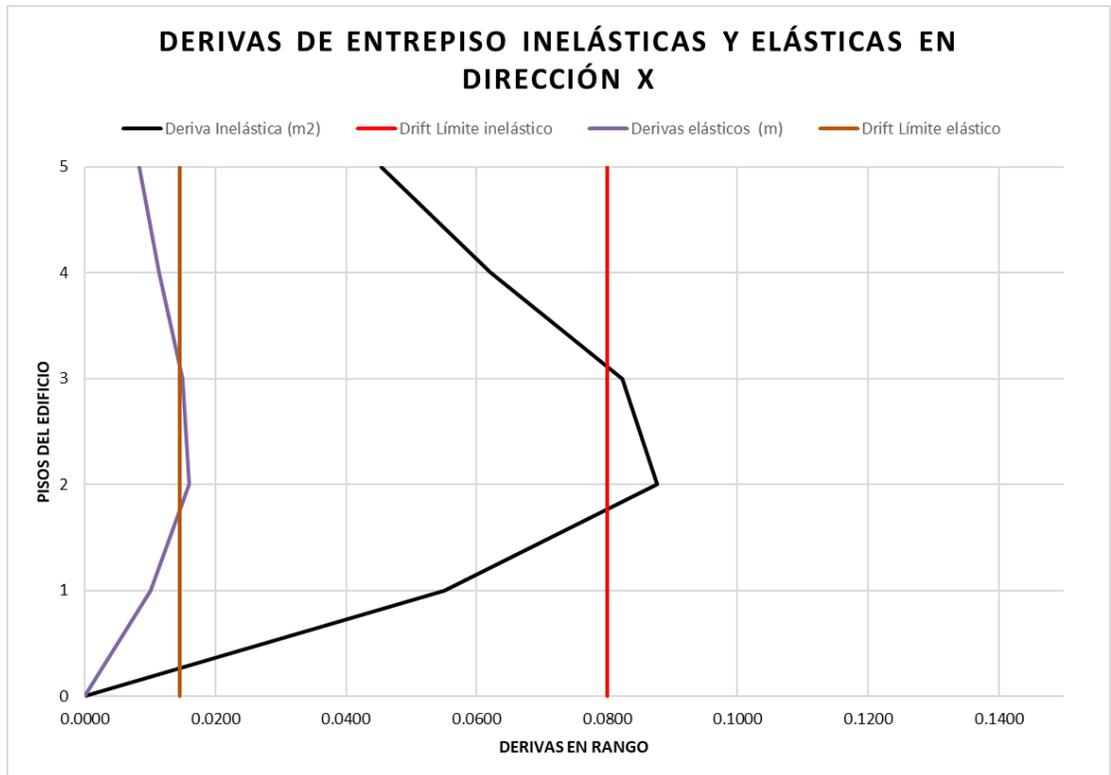
Fuente: elaboración propia.

Figura 76. Derivas de entrepiso en dirección X del proyecto de la escuela utilizando línea de historia de la estación CESEM



Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel 2021.

Figura 77. **Derivas de entrepiso en dirección X del proyecto de la escuela utilizando línea de historia de la estación San Cristóbal**



Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel 2021.

Tabla LX. **Derivas de entrepiso en dirección Y sin aisladores en la edificación de la escuela utilizando línea de historia de la estación CESEM**

DIRECCIÓN Y							
Piso	Altura (m)	Load Case	Desplazamiento Etabs (m)	Δ ultima Max (m)	Derivas elásticas Y. (m)	Deriva Inelástica (m2)	Verificación
Techo	4.00	SDY Max Cesem	0.089023	0.08000	0.011047	0.060759	Cumple
4	4.00	SDY Max Cesem	0.077976	0.08000	0.016117	0.088644	No cumple
3	4.00	SDY Max Cesem	0.061859	0.08000	0.022112	0.121616	No cumple
2	4.00	SDY Max Cesem	0.039747	0.08000	0.024624	0.135432	No cumple
1	4.00	SDY Max Cesem	0.015123	0.08000	0.015123	0.083177	No cumple
Base	0.00	SDY Max Cesem	0.00000	0.08000	0.00000	0.0000	

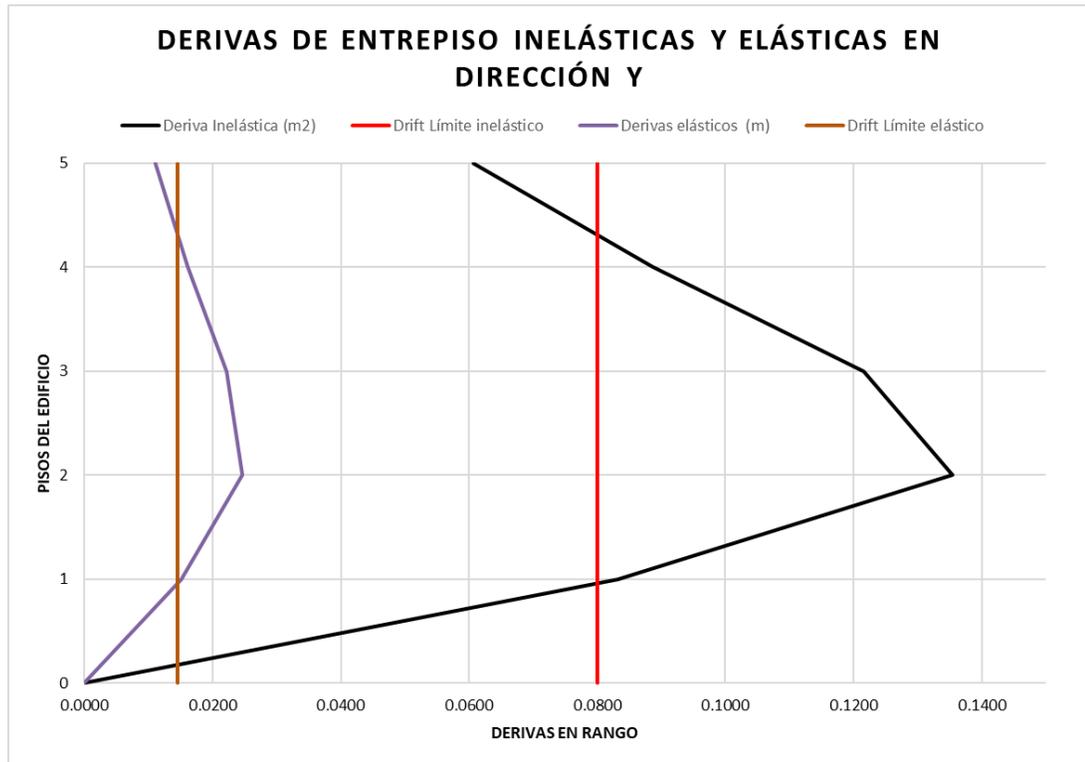
Fuente: elaboración propia.

Tabla LXI. **Derivas de entrepiso en dirección Y sin aisladores en la edificación de la escuela utilizando línea de historia de la estación San Cristóbal**

DIRECCIÓN Y							
Piso	Altura (m)	Load Case	Desplazamiento Etabs (m)	Δ ultima Max (m)	Derivas elásticas Y. (m)	Deriva Inelástica (m2)	Verificación
Techo	4.00	SDY Max Cristóbal	0.068525	0.08000	0.013101	0.072056	Cumple
4	4.00	SDY Max Cristóbal	0.055424	0.08000	0.012538	0.068959	Cumple
3	4.00	SDY Max Cristóbal	0.042886	0.08000	0.010851	0.059681	Cumple
2	4.00	SDY Max Cristóbal	0.032035	0.08000	0.016953	0.093242	No cumple
1	4.00	SDY Max Cristóbal	0.015082	0.08000	0.015082	0.082951	No cumple
Base	0.00	SDY Max Cristóbal	0.00000	0.08000	0.00000	0.0000	

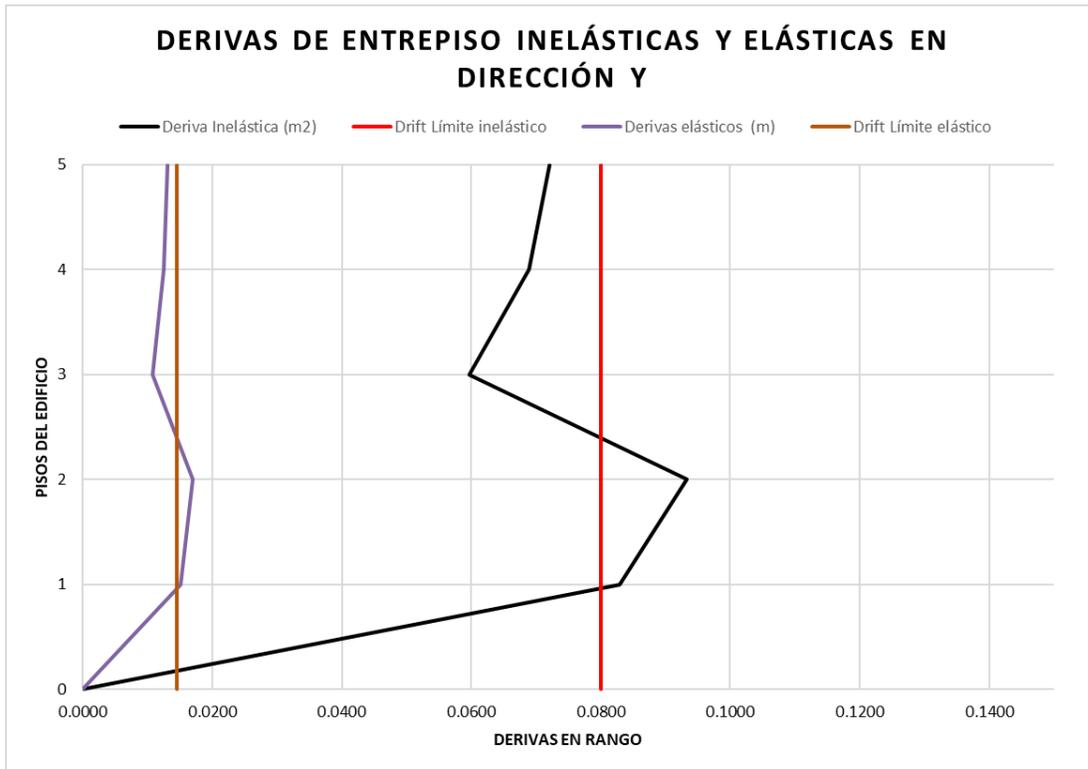
Fuente: elaboración propia.

Figura 78. Derivas de entrepiso en dirección Y del proyecto de la escuela utilizando línea de historia de la estación CESEM



Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel 2021.

Figura 79. Derivas de entrepiso en dirección Y del proyecto de la escuela utilizando línea de historia de la estación San Cristóbal



Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel 2021.

Figura 80. **Desplazamientos de entrepiso en dirección X, Y del proyecto del hospital utilizando línea de historia de la estación CESEM**



Fuente: elaboración propia, realizado con software ETABS.

Figura 81. **Desplazamientos de entrepiso en dirección X, Y del proyecto del hospital utilizando línea de historia de la estación San Cristóbal**



Fuente: elaboración propia, realizado con software ETABS.

Como se puede observar, el primer nivel no cumple con la exigencia de la norma, porque las derivas son mayores que el límite de 0.020 de edificación en general predeterminado por AGIES. Las derivas máximas de piso, no chequean en el primer nivel sin embargo del segundo nivel hasta al nivel techo si cumple, el motivo que no cumple el primer nivel en el sentido X, Y del edificio es por la forma de diseño de la estructura, también influyen los elementos estructurales del edificio y las combinaciones de carga que se propuso para este tipo de investigación y por el análisis historia de tiempo de los acelerogramas seleccionados, como se puede visualizar con facilidad en las figuras que no posee un buen comportamiento en cuanto a las derivas elásticas e inelásticas en el sentido X, Y.

5.2. Edificio con aisladores

Para observar la conducta de la composición analizada con los aisladores FPT, se hizo el diseño como se explica anteriormente en la estructura ya diseñada en el programa ETABS, y se hizo un estudio de análisis no lineal. En la tabla se muestran las derivas de la estructura. En este caso, se empleó aisladores en la base como se explica anteriormente.

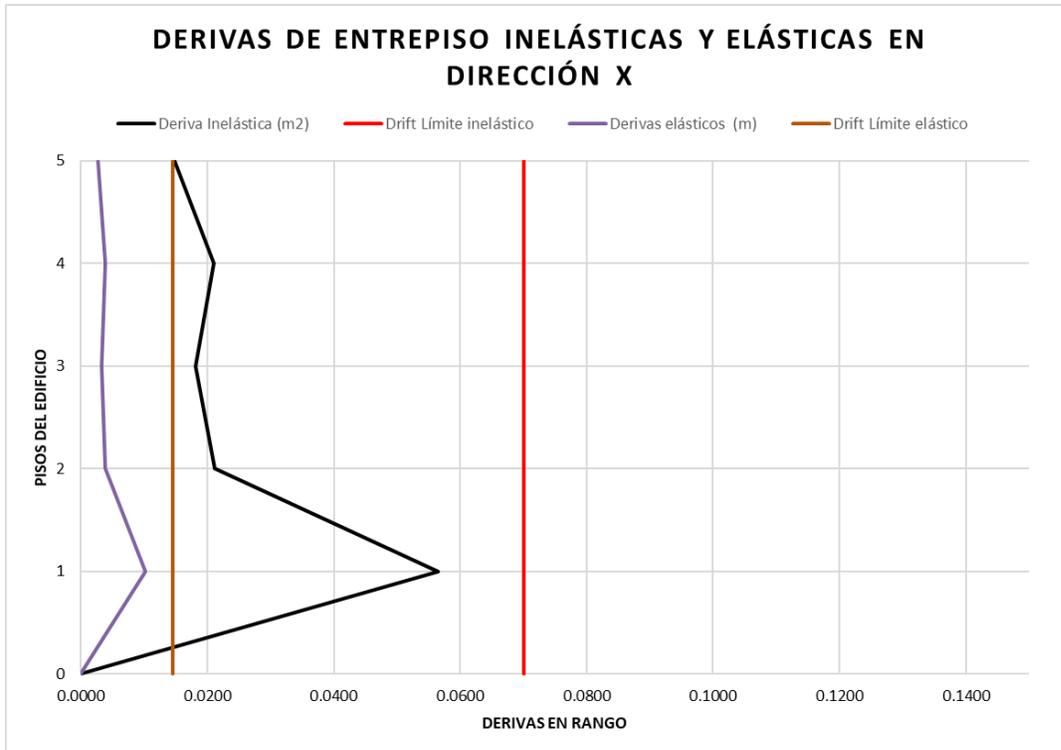
Las derivas presentadas fueron logradas, utilizando los registros sísmicos ya calibrados al espectro correspondiente, por marcos dúctiles de concreto reforzado que tiene un factor R de 8, esto con la intención de compararlas con las derivas últimas permisibles de AGIES.

Tabla LXII. **Derivas de entrepiso en dirección X con aisladores en la edificación del hospital utilizando línea de historia de la estación CESEM**

DIRECCIÓN X							
Piso	Altura (m)	Load Case	Desplazamiento Etabs (m)	Δ ultima Max (m)	Derivas elásticas X (m)	Deriva Inelástica (m2)	Verificación
Techo	3.50	SDX Max Cesem	0.023933	0.07000	0.00269	0.01482	Cumple
4	3.50	SDX Max Cesem	0.021239	0.07000	0.00383	0.02107	Cumple
3	3.50	SDX Max Cesem	0.017409	0.07000	0.00329	0.01811	Cumple
2	3.50	SDX Max Cesem	0.014116	0.07000	0.00385	0.02119	Cumple
1	3.50	SDX Max Cesem	0.010264	0.07000	0.01026	0.05645	Cumple
Base	1.00	SDX Max Cesem	0.00000	0.00000	0.00000	0.0000	

Fuente: elaboración propia.

Figura 82. **Derivas de entrepiso en dirección X con aisladores en la edificación del hospital utilizando línea de historia de la estación CESEM**



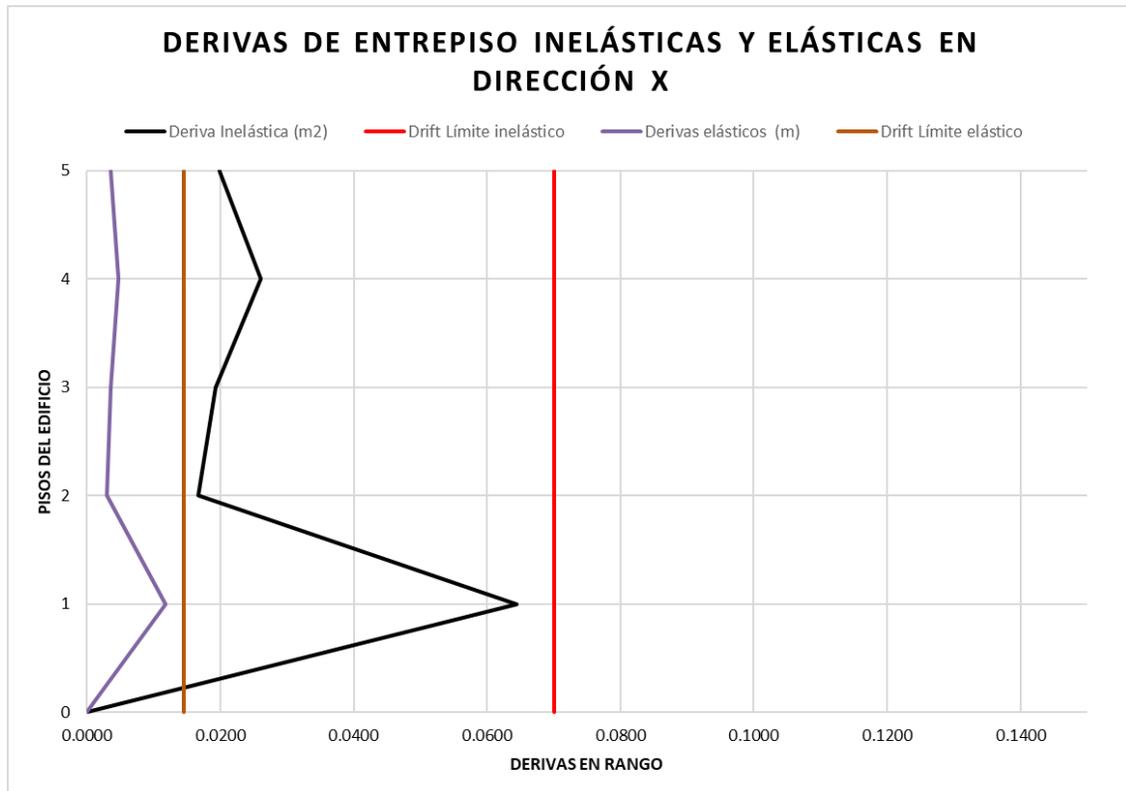
Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel 2021.

Tabla LXIII. **Derivas de entrepiso en dirección X con aisladores en la edificación del hospital utilizando línea de historia de la estación San Cristóbal**

DIRECCIÓN X							
Piso	Altura (m)	Load Case	Desplazamiento Etabs (m)	Δ ultima Max (m)	Derivas elásticas X. (m)	Deriva Inelástica (m2)	Verificación
Techo	3.50	SDX Max Cristóbal	0.026602	0.07000	0.00360	0.01980	Cumple
4	3.50	SDX Max Cristóbal	0.023002	0.07000	0.00473	0.02604	Cumple
3	3.50	SDX Max Cristóbal	0.018268	0.07000	0.00350	0.01923	Cumple
2	3.50	SDX Max Cristóbal	0.014771	0.07000	0.00305	0.01676	Cumple
1	3.50	SDX Max Cristóbal	0.011723	0.07000	0.01172	0.06448	Cumple
Base	1.00	SDX Max Cristóbal	0.00000	0.00000	0.00000	0.0000	

Fuente: elaboración propia.

Figura 83. **Derivas de entrepiso en dirección X con aisladores en la edificación del hospital utilizando línea de historia de la estación San Cristóbal**



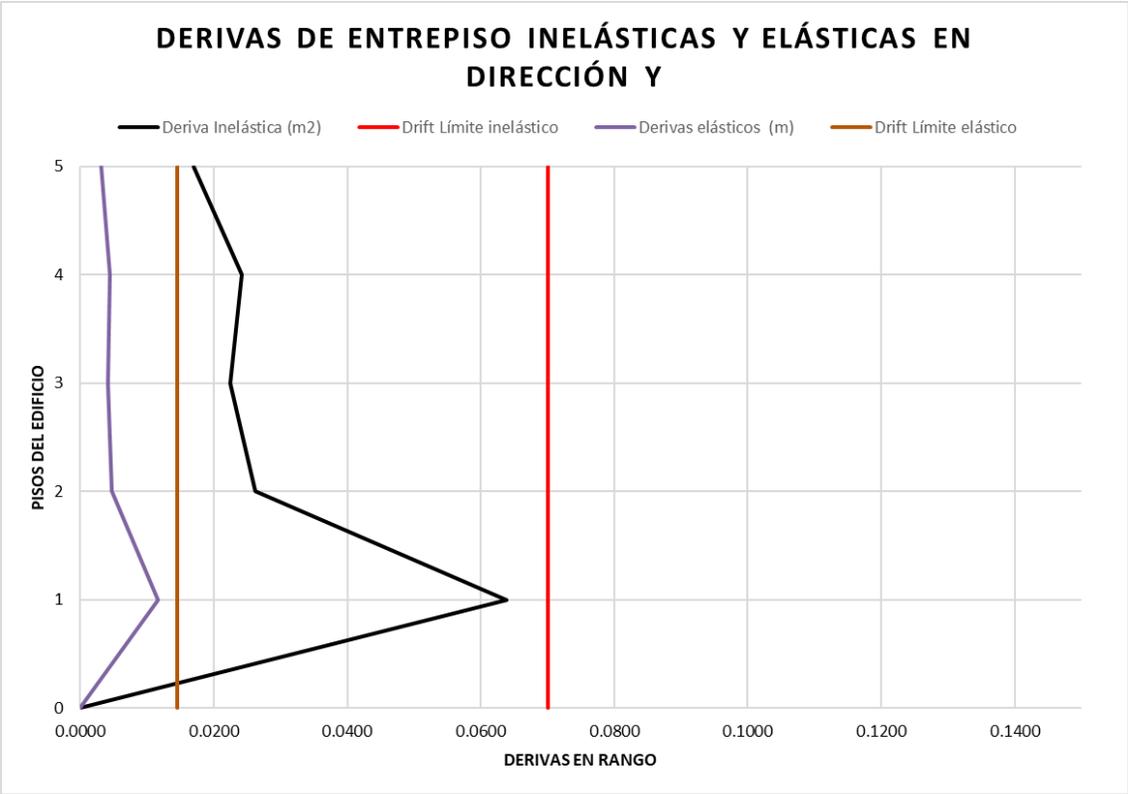
Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel 2021.

Tabla LXIV. **Derivas de entrepiso en dirección Y con aisladores en la edificación del hospital utilizando línea de historia de la estación CESEM**

DIRECCIÓN Y							
Piso	Altura (m)	Load Case	Desplazamiento Etabs (m)	Δ ultima Max (m)	Derivas elásticas Y. (m)	Deriva Inelástica Y. (m2)	Verificación
Techo	3.50	SDY Max Cesem	0.027943	0.07000	0.00309	0.01702	Cumple
4	3.50	SDY Max Cesem	0.024849	0.07000	0.00440	0.02419	Cumple
3	3.50	SDY Max Cesem	0.02045	0.07000	0.00408	0.02245	Cumple
2	3.50	SDY Max Cesem	0.016369	0.07000	0.00477	0.02621	Cumple
1	3.50	SDY Max Cesem	0.011604	0.07000	0.01160	0.06382	Cumple
Base	1.00	SDY Max Cesem	0.00000	0.00000	0.00000	0.0000	

Fuente: elaboración propia.

Figura 84. **Derivas de entrepiso en dirección Y con aisladores en la edificación del hospital utilizando línea de historia de la estación CESEM**



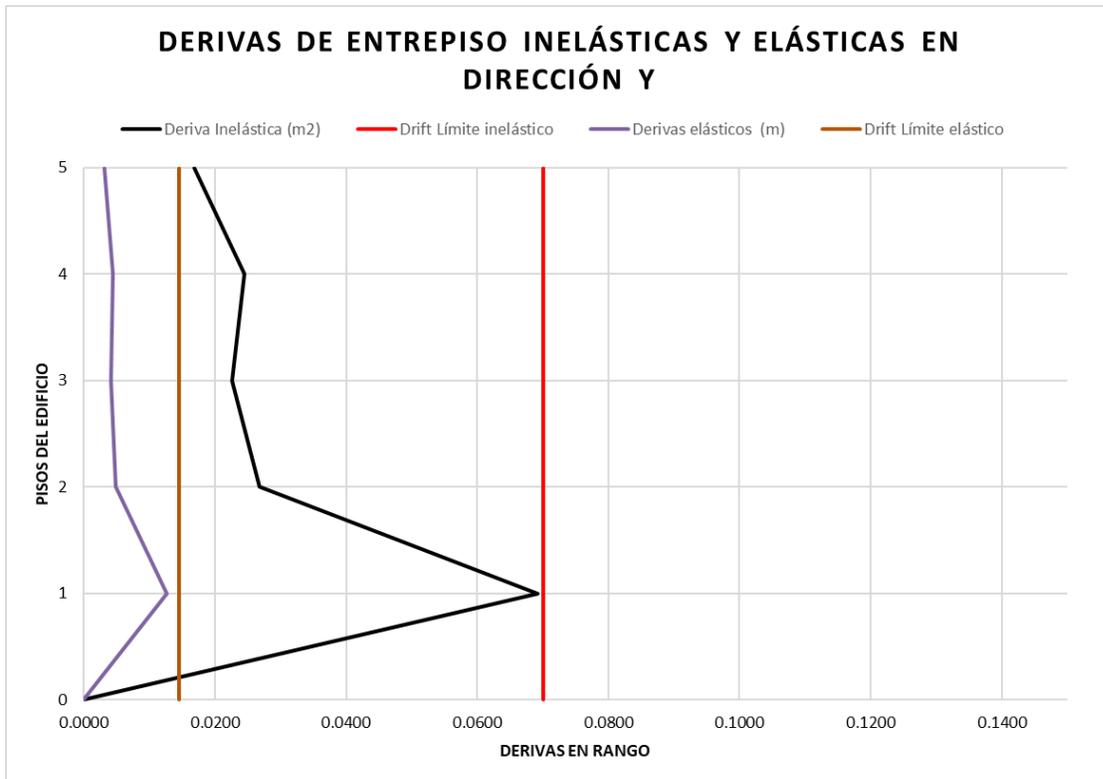
Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel 2021.

Tabla LXV. **Derivas de entrepiso en dirección Y con aisladores en la edificación del hospital utilizando línea de historia de la estación San Cristóbal**

DIRECCIÓN Y							
Piso	Altura (m)	Load Case	Desplazamiento Etabs (m)	Δ ultima Max (m)	Derivas elásticas Y. (m)	Deriva Inelástica Y. (m2)	Verificación
Techo	3.50	SDY Max Cristóbal	0.029099	0.07000	0.00307	0.01690	Cumple
4	3.50	SDY Max Cristóbal	0.026027	0.07000	0.00446	0.02455	Cumple
3	3.50	SDY Max Cristóbal	0.021564	0.07000	0.00412	0.02264	Cumple
2	3.50	SDY Max Cristóbal	0.017448	0.07000	0.00486	0.02674	Cumple
1	3.50	SDY Max Cristóbal	0.012586	0.07000	0.01259	0.06922	Cumple
Base	1.00	SDY Max Cristóbal	0.00000	0.00000	0.00000	0.0000	

Fuente: elaboración propia.

Figura 85. **Derivas de entrepiso en dirección Y con aisladores en la edificación del hospital utilizando línea de historia de la estación San Cristóbal**



Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel 2021.

Tabla LXVI. **Derivas de entrepiso en dirección Y con aisladores en la edificación de la escuela utilizando línea de historia de la estación CESEM**

DIRECCIÓN Y							
Piso	Altura (m)	Load Case	Desplazamiento Etabs (m)	Δ ultima Max (m)	Derivas elásticas X. (m)	Deriva Inelástica (m2)	Verificación
Techo	4.00	SDY Max Cesem	0.026862	0.08000	0.002383	0.013107	Cumple
4	4.00	SDY Max Cesem	0.024479	0.08000	0.003693	0.020312	Cumple
3	4.00	SDY Max Cesem	0.020786	0.08000	0.005322	0.029271	Cumple
2	4.00	SDY Max Cesem	0.015464	0.08000	0.005457	0.030014	Cumple
1	4.00	SDY Max Cesem	0.010007	0.08000	0.010007	0.055039	Cumple
Base	1.00	SDY Max Cesem	0.00000	0.00000	0.00000	0.0000	

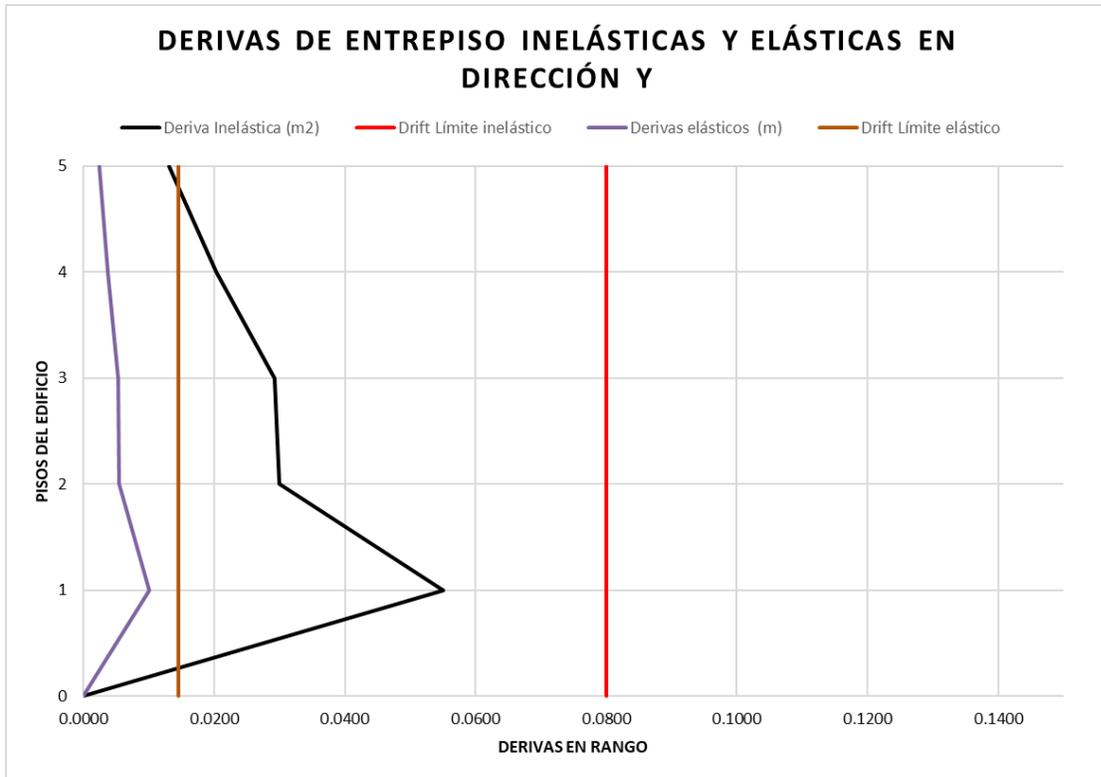
Fuente: elaboración propia.

Tabla LXVII. **Derivas de entrepiso en dirección X con aisladores en la edificación de la escuela utilizando línea de historia de la estación CESEM**

DIRECCIÓN X							
Piso	Altura (m)	Load Case	Desplazamiento Etabs (m)	Δ ultima Max (m)	Derivas elásticas X. (m)	Deriva Inelástica (m2)	Verificación
Techo	4.00	SDX Max Cesem	0.019923	0.08000	0.001995	0.010973	Cumple
4	4.00	SDX Max Cesem	0.017928	0.08000	0.002719	0.014955	Cumple
3	4.00	SDX Max Cesem	0.015209	0.08000	0.003672	0.020196	Cumple
2	4.00	SDX Max Cesem	0.011537	0.08000	0.004556	0.025058	Cumple
1	4.00	SDX Max Cesem	0.006981	0.08000	0.006981	0.038396	Cumple
Base	1.00	SDX Max Cesem	0.00000	0.00000	0.00000	0.0000	Cumple

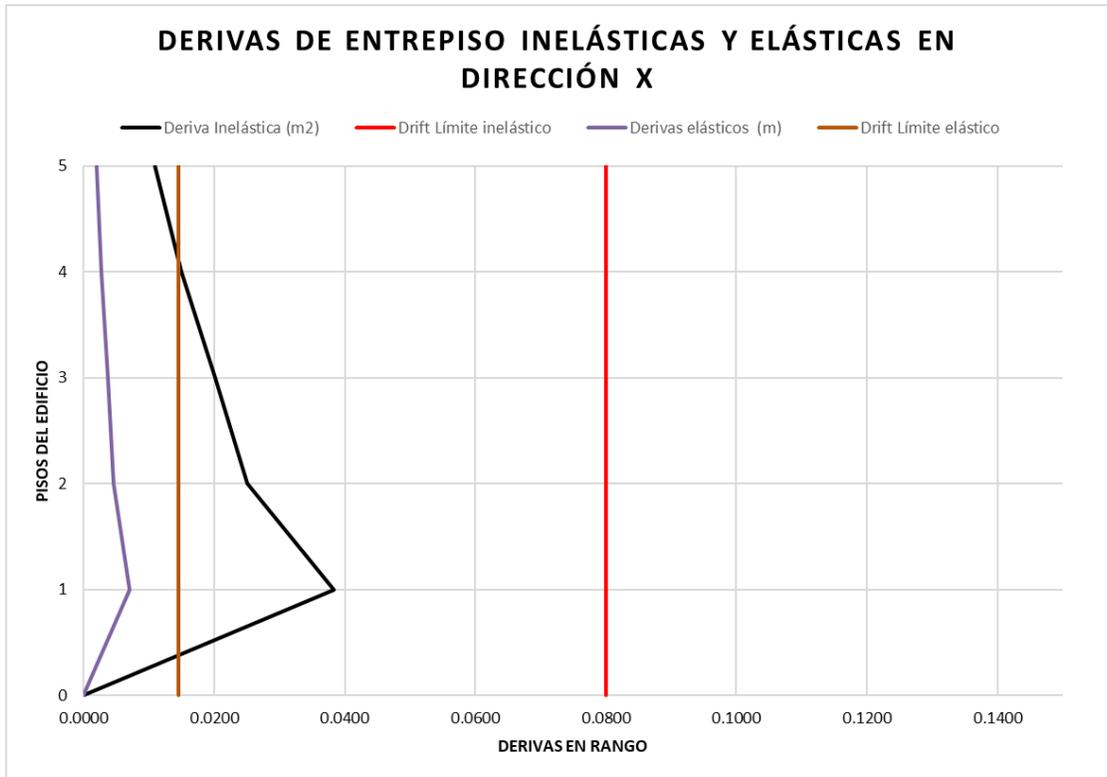
Fuente: elaboración propia.

Figura 86. **Derivas de entrepiso en dirección Y con aisladores en la edificación de la escuela utilizando línea de historia de la estación CESEM**



Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel 2021.

Figura 87. **Derivas de entrepiso en dirección X con aisladores en la edificación de la escuela utilizando línea de historia de la estación CESEM**



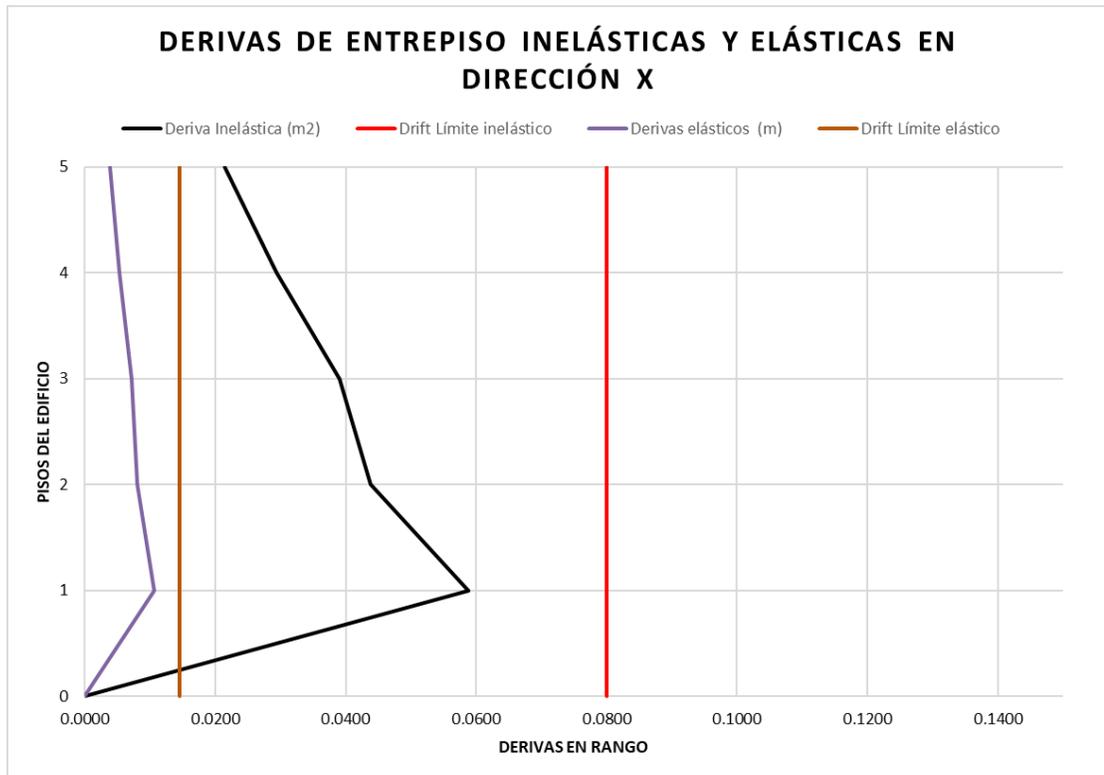
Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel 2021.

Tabla LXVIII. **Derivas de entrepiso en dirección X con aisladores en la edificación de la escuela utilizando línea de historia de la estación San Cristóbal**

DIRECCIÓN X							
Piso	Altura (m)	Load Case	Desplazamiento Étabs (m)	Δ ultima Max (m)	Derivas elásticas X (m)	Deriva Inelástica (m2)	Verificación
Techo	4.00	SDX Max Cristóbal	0.035008	0.08000	0.003899	0.021445	Cumple
4	4.00	SDX Max Cristóbal	0.031109	0.08000	0.005335	0.029343	Cumple
3	4.00	SDX Max Cristóbal	0.025774	0.08000	0.007108	0.039094	Cumple
2	4.00	SDX Max Cristóbal	0.018666	0.08000	0.007974	0.043857	Cumple
1	4.00	SDX Max Cristóbal	0.010692	0.08000	0.010692	0.058806	Cumple
Base	1.00	SDX Max Cristóbal	0.00000	0.00000	0.00000	0.0000	Cumple

Fuente: elaboración propia.

Figura 88. **Derivas de entrepiso en dirección X con aisladores en la edificación de la escuela utilizando línea de historia de la estación San Cristóbal**



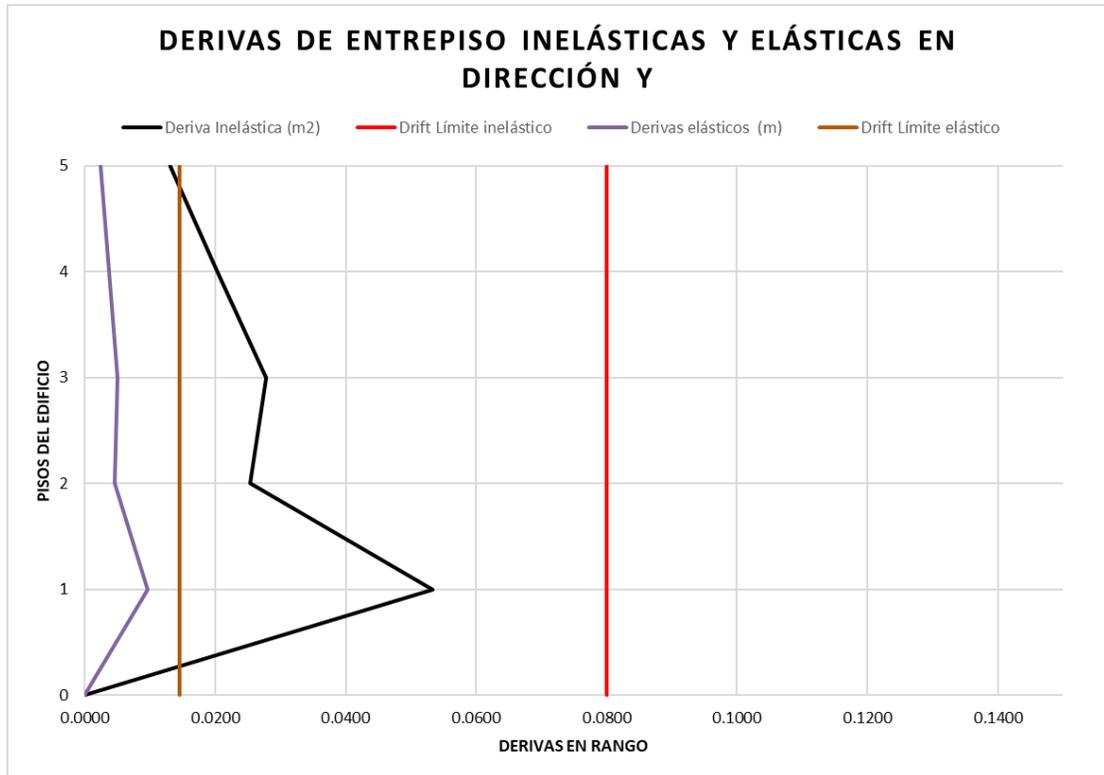
Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel 2021.

Tabla LXIX. **Derivas de entrepiso en dirección Y con aisladores en la edificación de la escuela utilizando línea de historia de la estación San Cristóbal**

DIRECCIÓN Y							
Piso	Altura (m)	Load Case	Desplazamiento Etabs (m)	Δ ultima Max (m)	Derivas elásticas X (m)	Deriva Inelástica (m2)	Verificación
Techo	4.00	SDY Max Cristóbal	0.025441	0.08000	0.002390	0.013145	Cumple
4	4.00	SDY Max Cristóbal	0.023051	0.08000	0.003685	0.020268	Cumple
3	4.00	SDY Max Cristóbal	0.019366	0.08000	0.005067	0.027869	Cumple
2	4.00	SDY Max Cristóbal	0.014299	0.08000	0.004611	0.025361	Cumple
1	4.00	SDY Max Cristóbal	0.009688	0.08000	0.009688	0.053284	Cumple
Base	1.00	SDY Max Cristóbal	0.00000	0.00000	0.00000	0.0000	Cumple

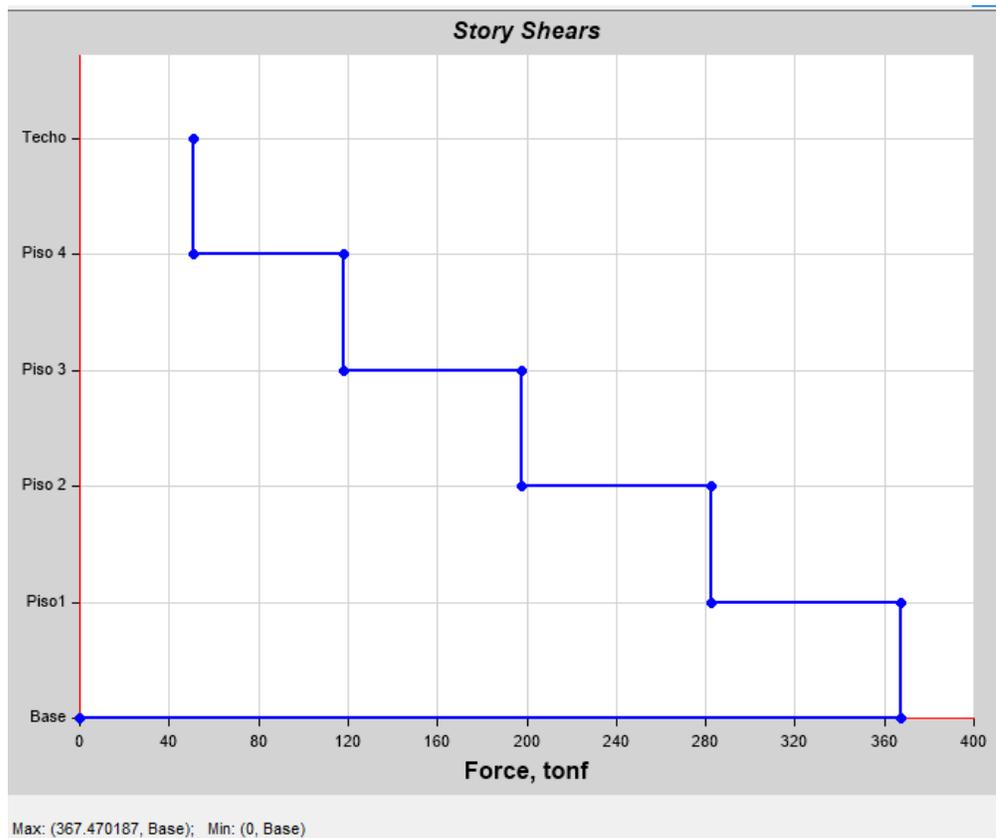
Fuente: elaboración propia.

Figura 89. **Derivas de entrepiso en dirección Y con aisladores en la edificación de la escuela utilizando línea de historia de la estación San Cristóbal**



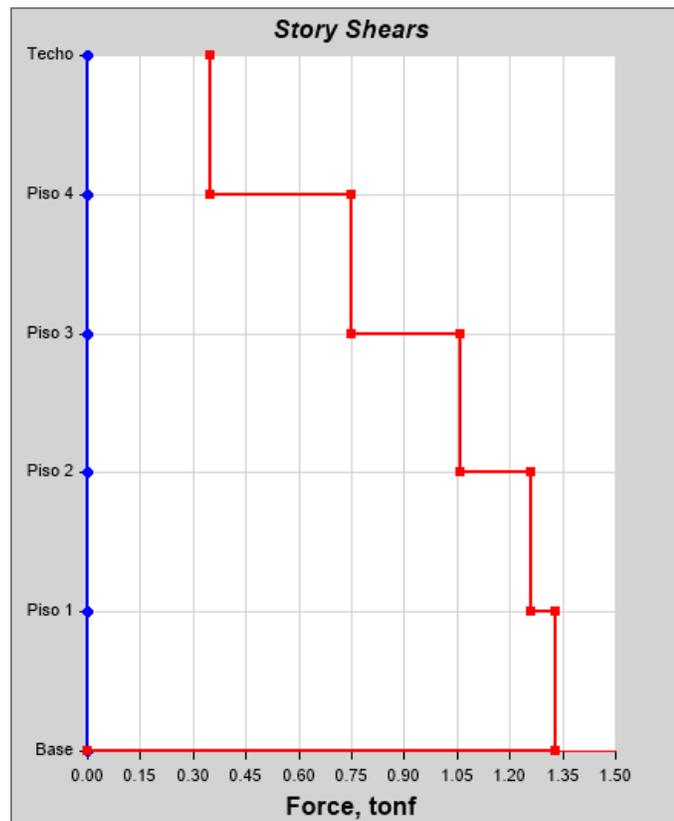
Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel 2021.

Figura 90. Diagrama de fuerzas cortantes para la superestructura en la edificación del hospital



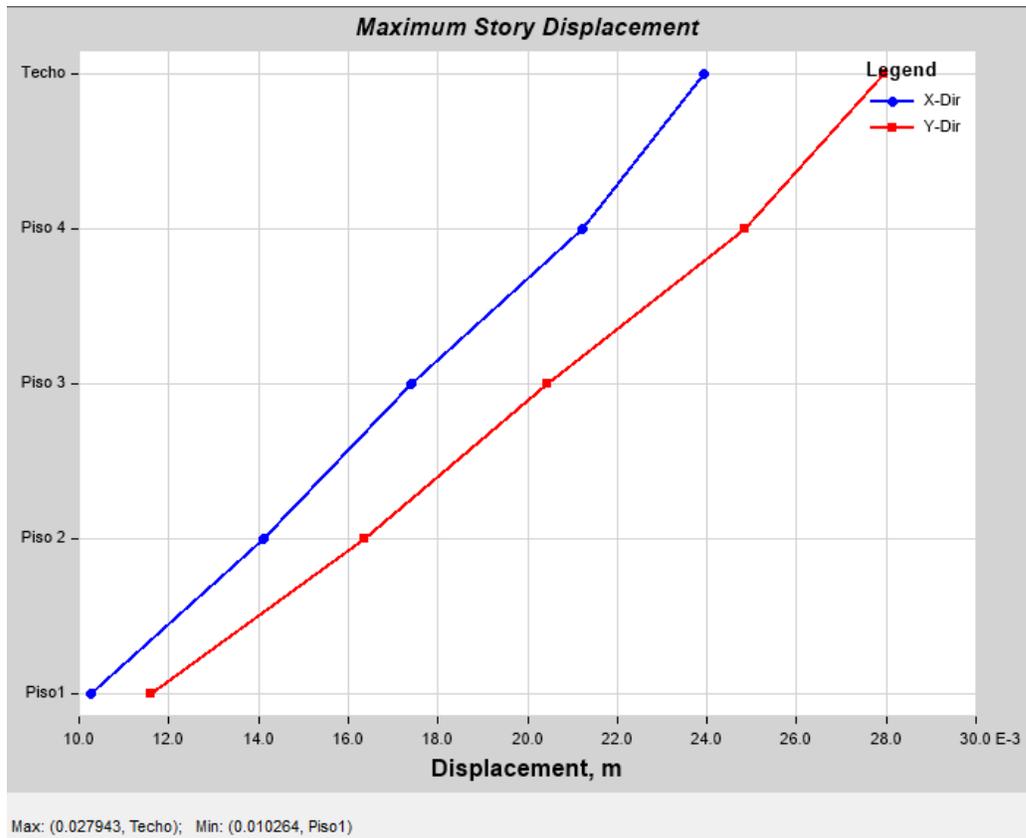
Fuente: elaboración propia, realizado con software ETABS.

Figura 91. **Diagrama de fuerzas cortantes para la superestructura en la edificación de la escuela**



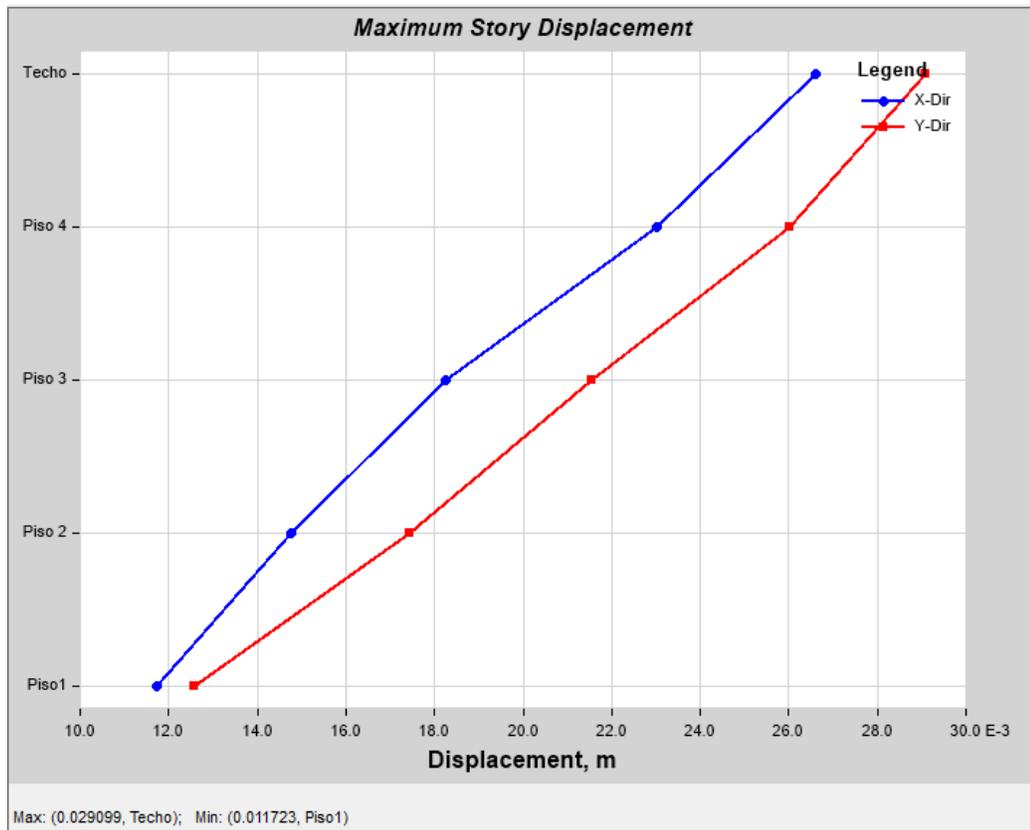
Fuente: elaboración propia, realizado con software ETABS.

Figura 92. **Desplazamiento para el sismo máximo en dirección X, Y utilizando aisladores de la edificación hospital utilizando línea de historia de la estación CESEM**



Fuente: elaboración propia, realizado con software ETABS.

Figura 93. **Desplazamiento para el sismo máximo en dirección X, Y utilizando aisladores de la edificación hospital utilizando línea de historia de la estación San Cristóbal**



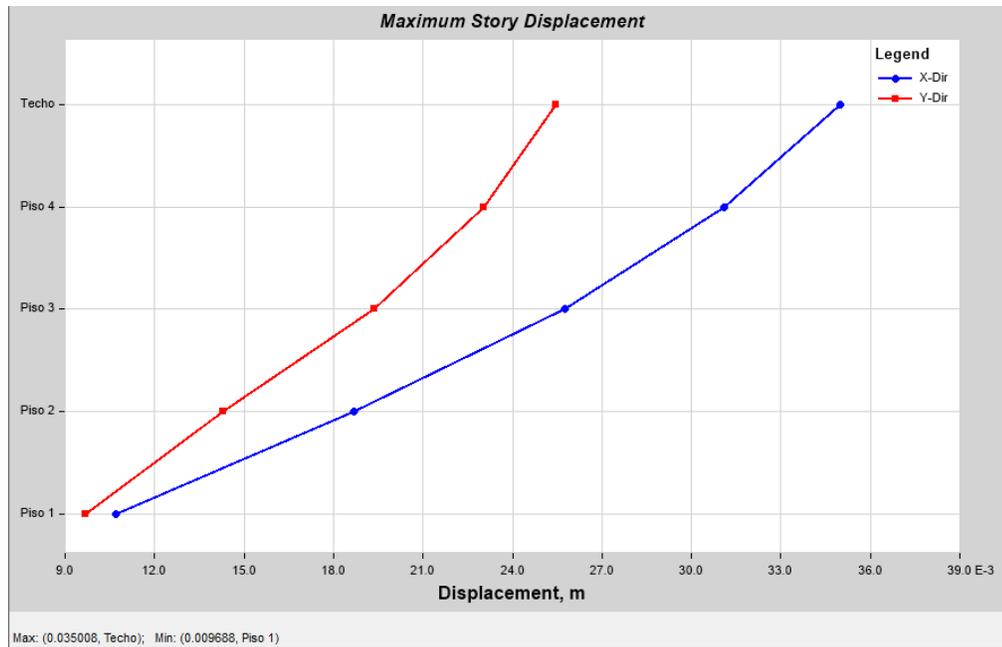
Fuente: elaboración propia, realizado con software ETABS.

Figura 94. **Desplazamiento para el sismo máximo en dirección X, Y utilizando aisladores de la edificación escuela utilizando línea de historia de la estación CESEM**



Fuente: elaboración propia, realizado con software ETABS.

Figura 95. **Desplazamiento para el sismo máximo en dirección X, Y utilizando aisladores de la edificación escuela utilizando línea de historia de la estación San Cristóbal**



Fuente: elaboración propia, realizado con software ETABS.

Como se puede observar todas las derivas elásticas e inelásticas chequean en los 4 niveles de las dos edificaciones, por lo que se puede comprobar la eficiencia de los aisladores de triple péndulo, el primer nivel es el que está más afectado por los desplazamientos en algunos casos debido a la mayor participación de masa ya que cuenta con una altura de piso mayor debido al desplante de la cimentación por la estructura aislada, la mayor deriva de piso corresponde al edificio del hospital es del primer nivel con un valor de 2.90 cm, y con la estructura del edificio de la escuela con un valor de 3.50 cm, cuando la deriva máxima es de 7 cm en la edificación del hospital y 8cm de la edificación de la escuela, con esto se puede observar que el modelamiento y los cálculos

son satisfactorios, ya que la deriva máxima del modelo sin aisladores es de 7.92 cm en la edificación del hospital y 8.90 de la edificación de la escuela.

5.3. Discusión de los resultados

De lo visto de este trabajo se explicó la base teórica y la formulación de los aisladores FPT, los cuales permitieron verificar ciertas características inherentes de los aisladores FPT que son beneficiosas para las construcciones.

Los parámetros constitutivos del aislador afectan la respuesta sísmica del sistema de aislamiento de forma diferente. A medida que disminuye el radio de curvatura, aumenta el parámetro de rigidez post elástica, mientras que aumenta el período del aislador, determinando un aumento en el aplazamiento de masa, así como el espectro de post elasticidad en el final. Cuando el período del aislador se ha valorado similar al del evento sísmico al que se registra, se valora el desplazamiento máximo.

También se ve la libertad entre el tiempo de vibración y la carga soportada, esto posibilita hacer el prediseño de los aisladores sin tener entendimiento de las cargas de la construcción. El segundo, es la función de minimizar o borrar la torsión en planta en construcciones regulares, esto da como resultado de que el centro de rigidez del sistema de aislación coincide con el centro de masa de la composición aislada. De modo que, en las estructuras aisladas con péndulos friccionales se obtendrá menos refuerzo de acero, menos magnitud de vigas y columnas, y por consiguiente un ahorro económico de la superestructura.

El coeficiente de fricción implica un aumento de la componente de amortiguación con la consiguiente disminución de los desplazamientos máximos.

El impulso del evento sísmico no ve una dirección proporcional con el aumento de la aceleración en la estructura.

En la norma ASCE 7-16 contempla que se puede usar un factor de R superior de 2 siempre y cuando se haga un análisis de resistencia en la base donde se colocara el aislador. El aislador triple péndulo puede proporcionar un mejor desempeño estructural, sin embargo, disminuir el factor R se hace un diseño con menor ductilidad, pero garantizan una vida útil mayor a la edificación aproximadamente 80 años y un factor económico muy aceptable.

CONCLUSIONES

1. Los aisladores de triple péndulo de fricción reducen las fuerzas de corte de la estructura y las desviaciones entre pisos, permitiendo que el sistema estructural superior permanezca elástico durante cargas sísmicas severas y así las reducciones en derivas reducen significativamente los daños a componentes de construcción causados por sismos.
2. La respuesta de la estructura con el uso de este tipo de aislador se explicó completamente a través de los diagramas de corte y derivas, con diferencias muy grandes en comparación con los resultados obtenidos con la edificación sin uso de aisladores, la diferencia entre los modos de vibración resultó en diferencias tan grandes como entre 5 a 30 %, así se reduce costos en construcción para edificaciones con niveles más grandes.
3. A medida que aumenta la impulsividad del sismo, el valor máximo de aceleración en la estructura es menor que el del suelo, esto conlleva a la activación del movimiento del aislante ya que las fuerzas laterales transmitidas por el sismo han superado la resistencia del coeficiente de fricción dando como resultado una traslación rígida de la estructura soportada por los aisladores, que son los que absorben las fuerzas laterales transmitidas por el evento sísmico a través del deslizamiento, y con esto se atribuye la respuesta dinámica que brindan los aisladores de triple péndulo de fricción para que el sistema estructural superior quedara en modo elástico por el aumento de la amortiguación del sistema.

4. Los parámetros constitutivos del aislador triple péndulo afectan la respuesta sísmica del sistema de aislamiento de una manera diferente, a medida que aumenta el radio de curvatura, el parámetro de rigidez post elástica disminuye, mientras que el propio período del aislante aumenta, lo que resulta en un aumento en el desplazamiento máximo, como se esperaba del espectro de respuesta en términos de desplazamiento, cuando el propio período del aislador tiene valores similares a los del evento sísmico al que está sujeto, se registran los valores máximos de desplazamiento.

RECOMENDACIONES

1. En la norma actual de AGIES no existen requisitos de diseño de este tipo de aisladores y debe ser adoptado según la norma ASCE 7-16, por lo que es recomendable crear una norma específica sobre el uso de aisladores en un futuro como lo han hecho en otros países.
2. Siempre verificar que el profesional que va a implementar en una construcción con aisladores debe tener todos los estándares del fabricante tales como los materiales aislantes, fabricación y procedimientos de prueba, para su correcto diseño del mismo.
3. Es necesario que la supervisión cuente con amplio criterio técnico sobre la instalación de los dispositivos, de forma que se posibilite la inspección, el mantenimiento y el reemplazo de dispositivos, por lo cual al ingreso a los mismos debería ser previsto en el diseño.
4. En el proceso de desarrollar edificios utilizando sistemas aislados en nuestro país se debe tomar como énfasis en que los diseños para este tipo de sistemas de aisladores sean realizados bajo una revisión por pares.

REFERENCIAS

1. Aguilar, R., Almazán, J., Dechent, P., y Suarez, V. (2008). *Aisladores de base elastoméricos y FPS*. Ecuador: Universidad de las fuerzas armadas.
2. Aguilar, R., Almazán, J., Dechent, P. y Suárez, V. (2008). *Aisladores elastoméricos y FPS*. Ecuador: Centro de Investigaciones Científicas. Escuela Politécnica del Ejército ESPE.
3. Akiyama, H. (2003). *Metodología de proyecto sismorresistente de edificios basada en el balance energético*. España: Editorial Reverte.
4. Amaral, F. V. (2013). *Effect of vertical component of earthquake on the response*. Lisboa: Departamento de Engenharia Civil of Instituto Superior Técnico.
5. ArcGIS. (25 de mayo, 2020). *Mapa base. Fallas*. [Mensaje de un blog]. resuperado de <https://www.arcgis.com/home/webmap/viewer.html?layers=a61a2509c6bc49729389d16216ae0069>
6. ASCE 7-16, A. S. (s.f.). *Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures 7-16*. Virginia: Library of Congress Cataloging in Publication Data.
7. Asociacion Guatemalteca de Ingenieria Estructural y Sismoresistente, AGIES. (2018). *Generalidades, administración de las normas y*

supervisión técnica. Guatemala: Cámara Guatemalteca de construcción.

8. Becker, T. (2011). *Advanced Modeling of the Performance of Structures Supported on Triple Friction Pendulum Bearings*. California: University of California, Berkeley.
9. Cámara Guatemalteca de la Construcción. (29 de octubre, 2020). *Perspectivas económicas del sector construcción 2020*. [Mensaje de un blog]. Recuperado de <https://www.bnamericas.com/es/entrevistas/camara-guatemalteca-de-la-construccion-preve-que-2021-sera-ano-record>
10. Cheng, F., Hongping, J., y Kangyu, L. (2008). *Smart Structures: Innovative Systems for Seismic Response Control*. Londres: CRC Press.
11. Christopoulos, C., y Filiatrault, A. (2006). *Principles of Passive Supplemental Damping and Seismic Isolation*. Pavia, Italia: IUSS Press.
12. Coburn, A., y Spence, R. (2002). *Earthquake Protection*. United State: John Wiley & Sons, Ltd.
13. Constantinou, M., Aguilar, R., Morales, E., y Caiza, P. (2016). *Desempeño de aislador fpt8833/12-12/8-5 en el análisis sísmico del centro de investigaciones y de post grado de la UFA-ESPE*. Estados Unidos: Universidad Fuerzas Armadas.

14. Constantinou, M., Kalpakidis, I.; Filiatrault, A.; y Lay, R. (2011). *LRFD Based Analysis and Design Procedures for Bridge Bearings and Seismic Isolators*. Estados Unidos: Universidad Fuerzas Armadas
15. Escuela Abierta de Desarrollo en Ingeniería y Construcción, E. (28 de agosto, 2019). *Rol de aislamiento en la estructura*. [Mensaje de un blog]. Recuperado de <https://www.eadic.com/rol-del-aislamiento-de-base-en-las-estructuras/>
16. Eroz, M. y DesRochesb, R. (2008). *Bridge seismic response as a function of the friction pendulum system (fps) modeling assumptions*. Journal of Engineering Structures.
17. Espinel, G., y Herrera, P. (2013). *Diseño sísmico con sistemas de amortiguamiento en edificios regulares de hormigón armado y comparación mediante ejemplos*. Quito, Ecuador: Pontificia Universidad Católica de Ecuador.
18. Fadi, M. (Enero de 2010). *Evaluation of simplified methods of analysis for structures with triple friction pendulum isolators*. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 39(1), 5-22.
19. Fenz, D. y Constantinou, M. (2 de julio, 2007). *Mechanical Behavior of Multi-Spherical Sliding Bearings*. [Mensaje de un blog]. Recuperado de <http://mceer.buffalo.edu/publications/catalog/reports/Mechanical-Behavior-of-Multi-Spherical-Sliding-Bearings-MCEER-08-0007.html>

20. Fenz, D., y Constantinou, M. (2008). *Development, Implementation and Verification of Dynamic Analysis Models for Multi-Spherical Sliding Bearings*. New York: University at Buffalo, New York.
21. Fenz, D., y Constantinou, M. (Octubre de 2008). *Spherical sliding isolation bearings with adaptive behavior: Experimental verification*. United State Of America: Earthquake engineering & structural dynamics, 37(2), 185–205.
22. Flores, D. y Ravelo, M. (2019). *Comparación técnica y economica entre un sistema dual y un sistema con aislador elastomerico con núcleo de plomo LRB para un edificio en el distrito de Surquillo 2019*. Lima, Peru: Universidad Ricardo Palma.
23. Galan, B. y Boza, Z. (2013). *Diseño de un edificio aporticado con disipadores en arreglo Chevron*. (Tesis de licenciatura). Pontificia Universidad Católica del Perú, Perú. Recuperado de https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/20.500.12404/4518/BOZA_ZUEN_Y_GALAN_DANNY_DISIPADORES_ENER_GIA_CHEVRON.pdf?sequence=1&isAllowed=y
24. Gamboa, R. (2019). *Análisis sísmico de hospitales considerando el criterio de funcionalidad continua empleando aisladores de base friccional de triple péndulo en zonas sísmicas 3 y 4 del Perú*. (Tesis de licenciatura). Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, Peru. Recuperado de file:///C:/Users/Casa/Downloads/TESIS%20CIV508_Mar.pdf

25. Hussaini; Zayas y Constantinou. (1994). *Seismic Isolation of Multi-Story Frame Structures Using Spherical Sliding Isolation Systems*. Buffalo, New York: Department of Civil Engineering State ,University of New York at Buffalo.
26. Jaramillo, M. (2019). *Diseño de un edificio hospitalario con aislamiento de base*. (Tesis de licenciatura). Pontifica Universida Catolica de Peru, Peru. Recuperado de file:///C:/Users/Casa/Downloads/RODRIGUEZ_JARAMILLO_MIGUEL_DISE%C3%91O_EDIFICIO_HOSPITALARIO.pdf
27. Lacayo, V. (2015). *Análisis del comportamiento de un edificio de marcos de acero con disipadores de energía histeréticos*. Guatemala: Universidad Rafael Landivar.
28. Lafuente, C. (2016). *Introducción al uso de aisladores y disipadores en estructuras*. Caracas, Venezuela: Banco de desarrollo de America Latina.
29. Luna, D. (2005). *Estudio sobre el comportamiento dinamico de los aisladores sismicos con el sistema pendulo de friccion*. Bogota, Colombia: Universidad de los Andes.
30. Malekzadeh, M., y Taghikhany, T. (Septiembre de 2010). *Adaptive behavior of double concave friction pendulum bearing and its advantages over friction pendulum systems*. Scientia Iranica. Transaction A, Civil Engineering, 17(2), 81.

31. Malekzadeh, M., Movahednejad, M., y Mohammadi, A. (2009). *Multi stage performance of Triple pendulum bearing*. Iran: Department of Civil Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran.
32. Molina, A. (1995). *Ingeniería Sísmica*. Ediciones Uniandes, Ecoe Ediciones.
33. NEC, N. E. (2014). *Norma ecuatoriana de la construcción*. Ecuador: NEC.
34. Nguyen, N. V., V, C., Hoang, H. P., y Huong, K. (2018). *Performance of Single Friction Pendulum bearing for isolated buildings*. Vietnam: The University of Danang, University of Science and Technology.
35. Oviedo, J., y Duque, M. (2006). *Sistema de control sísmica en edificaciones*. Envigado, Colombia: Escuela de ingeniería de Antioquia.
36. Puchaicela, A. (2018). *Diseño y análisis de edificaciones con aisladores de base tipo FPT*. Ecuador: Universidad de Cuenca.
37. RAII-UNAM, B. (15 de noviembre, 2018). *Base de datos de registros acelerográficos de la RAII-UNAM*. [Mensaje de un blog]. Recuperado de <http://aplicaciones.iingen.unam.mx/>
38. Reddy, G. y Patil, S. (2012). *State Of Art Review - Base Isolation Systems For Structures*. India: International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering.

39. Ruíz, J. (2020). *Perspectivas economicas en el sector construccion 2020*. Guatemala: Revista Construccion Guatemala.
40. Saquicela, J. (2016). *Aisladores sismicos para edificaciones esenciales*. Ecuador: Universidad Catolica de Cuenca.
41. Sarlis, A., y Constantinou, M. (2013). *Model of Triple Friction Pendulum Bearing for General Geometric and Frictional Parameters and for Uplift Conditions*.
42. Taywade, W., y Narayan, M. (2015). *Sustainability of Structure Using Base Isolation Techniques for Seismic Protection*. IJIRSET Vol. 4.
43. Tsai, C. y Yung, L. (Enero de 2009). *Mechanical Characteristics and Modeling of Multiple Trench Friction Pendulum System with Multi-intermediate Sliding Plates*. World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering, 3(2), 70-87.
44. Vasant, A., Matsagar, R. (2004). *Influence of isolator characteristics on the response of base-isolated structures*. India: Department of Civil Engineering, Indian Institute of Technology Bombay, Powai, Mumbai 400 076, India.
45. Zayas, V. (1985). *Earthquake Protection Systems*. [Mensaje de un blog]. Recuperado de <https://www.earthquakeprotection.com/>

46. Zayas, V., Low, S., y Mahin, S. (1987). *The FPS Earthquake Resisting System Experimental*. Springfield Virginia: Report. Berkeley Calif, Earthquake Engineering Research Center.
47. Zayas, V., Mahin, S., y Constantinou, M. (2016). *Safe and Unsafe Seismically Isolated Structures*. Pacific Earthquake Engineering Research Center Headquarters at the University of California, Berkeley.
48. Zayas, V., Low, S., y Mahin, S. (Agosto de 1990). A Simple Pendulum Technique for Achieving Seismic Isolation. *Earthquake Spectra*, 6(2), 317–333.