

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE
HUAMANGA

FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS, GEOLOGÍA Y CIVIL

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



“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

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

Ingeniero Civil

PRESENTADO POR:

Russel Marcelo Gamboa

DIRIGIDO POR:

Ing. Rubén Américo Yachapa Condeña

Ayacucho - Perú

Enero de 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

RUSSEL MARCELO GAMBOA

Presentado a la Facultad de Ingeniería de Minas, Geología y Civil en cumplimiento
parcial de los requerimientos para optar el título de:

INGENIERO CIVIL

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA

Memoria presentada a la Comisión integrada por los profesores:

Luis Alfredo Vargas Moreno : Presiente

Edward León Palacios : Miembro

Rubén Américo Yachapa Condeña : Miembro
Asesor de Tesis

Quienes recomiendan que sea aceptada para
completar las exigencias del título de Ingeniero Civil.

Ayacucho - Perú

Enero de 2019

Resumen

La presente tesis desarrolla el análisis sísmico con criterios de diseño para la funcionalidad continua en edificaciones esenciales, con la finalidad de reducir el daño que pueda sufrir los elementos estructurales, no estructurales y componentes de una edificación frente a sismos severos, a un daño menor al cosmético¹. Para esto probamos si una estructura de base fija y base aislada tienen la capacidad de alcanzar los límites que establece la funcionalidad continua. Empezando con la recolección y adquisición de datos sobre la funcionalidad continua y el comportamiento de los aisladores de tipo triple péndulo friccional.

La modelación y análisis sísmico para las condiciones presentadas se realiza en el programa ETABS² en su versión 16.2.2, con el cual a partir de los resultados obtenidos podremos validar o negar las hipótesis propuestas.

Realizando esta comprobación en la muestra de estudio, Hospital de Coracora la cual consta de 5 niveles y una configuración estructural a base de pórticos, en la cual realizamos la comprobación considerando la estructura con base fija y para la misma implementada con el aislador FPT 8827/14-12/10-6.

Palabras clave: funcionalidad continua, aisladores, triple péndulo de fricción.

¹Daño cosmético, es el daño superficial no estructural que requieren intervención menor cuya finalidad es mejorar la apariencia estética superficial, como reparación de grietas o juntas de mortero.

²ETABS, Análisis Tridimensional Extendido de Edificaciones, el software ETABS tiene la capacidad de manejar desde la más simple edificación como hasta la más compleja, gracias a su capacidad de cálculo no lineal, haciéndola una herramienta casi obligatoria para los ingenieros estructurales.

Summary

This thesis develops seismic analysis with design criteria for continuous functionality in essential buildings, with the aim of reducing the damage that can suffer structural, non-structural elements and components of a building against severe earthquakes, to less damage to the cosmetic³. For this we tested whether a fixed base structure and isolated base have the capacity to reach the limits established by the continuous functionality. Starting with the collection and acquisition of data on the continuous functionality and the behavior of the insulators of triple frictional pendulum type.

The modeling and seismic analysis for the presented conditions is carried out in the ETABS⁴ program in its version 16.2.2, with which, based on the results obtained, we can validate or deny the hypotheses proposed.

Carrying out this check in the study sample, Hospital de Coracora which consists of 5 levels and a structural configuration based on gantries, in which we carry out the verification considering the structure with fixed base and for the same implemented with the isolator FPT 8827/ 14-12/10-6.

Keywords:continuous functionality, isolators, triple friction pendulum.

³Cosmetic damage, is the nonstructural superficial damage that require minor intervention whose purpose is to improve the superficial aesthetic appearance, such as repair of cracks or mortar joints.

⁴ETABS, Extended Three Dimensional Analysis of Building Systems, ETABS software has the ability to handle everything from the simplest building to the most complex, thanks to its non-linear calculation capacity, making it an almost obligatory tool for structural engineers.

Introducción

Durante años el hombre ha buscado protegerse de los desastres naturales, entre ellos el más común es el sismo, con la finalidad de lograr este objetivo se han desarrollado normativas a lo largo del tiempo. Por ser de interés internacional la protección sobretodo de las edificaciones esenciales como son los hospitales buscando que estos puedan seguir con su normal funcionamiento luego de ocurrido un sismo severo. Teniendo en cuenta esto, se plantea la aplicación de los criterios de diseño para la funcionalidad continua propuesta por Victor Zayas en el diseño sísmico, por esto surgen las dudas de que si una estructura de base convencional fija y una estructura aislada pueda cumplir con los límites establecidos para la funcionalidad continua. Para esto tomamos la muestra que es el Hospital de Coracora, en cuya estructura desarrollamos el análisis sísmico para condiciones de base fija y base aislada con el aislador de triple péndulo de fricción FPT 8827/14-12/10-6, y así poder verificar si se cumplen o no las condiciones para la funcionalidad continua.

La presente investigación es de utilidad para el campo de la ingeniera estructural, ya que se realiza el estudio de un criterio de diseño para la funcionalidad continua el cual es un concepto nuevo en el ámbito de la ingeniería, que actualmente se viene difundiendo a través de conferencias y artículos publicados de estudios realizados. El trabajo de investigación está desarrollada en los siguientes capítulos:

- Capítulo 1: Se desarrolla, el planteamiento del problema, descripción, delimitación, formulación del problema, justificación e importancia, limitaciones y objetivos.
- Capítulo 2: Se desarrolla el marco teórico, antecedentes, investigaciones internacionales y nacionales, bases teóricas y marco conceptual.
- Capítulo 3: Se desarrolla, el método de investigación, enfoque, alcance, diseño de la investigación, población y muestra, hipótesis, operacionalización de variables, técnicas e instrumentos, técnicas estadísticas, desarrollo del trabajo de tesis.
- Capítulo 4: Se desarrolla, los resultados, análisis e interpretación de los mismos y la contratación de hipótesis planteadas.
- Capítulo 5. En este último capítulo se desarrolla las conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros proyectados.

Dedicatoria

*A Dios por darme la vida, a mis padres
Leandro y Julia, quienes me apoyan y me
motivan a ser mejor cada día, a mis
hermanos José y Liseth por la motivación y
palabras de aliento.*

*Y, a quien me enseñó que la manera de
lograr cumplir los objetivos es con mucho
esfuerzo y dedicación, mi querido tío Juan
Gualberto (QEPD).*

Agradecimientos

A la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga - y los docentes de la Facultad de Ingeniería de Minas, Geología y Civil por su contribución en mi desarrollo académico y profesional.

Al Msc. Ing. Rubén A. Yachapa Condeña, por haberme brindado las bases y fundamentos en el análisis y diseño sísmico de estructuras y por su recomendación y sugerencias para la realización de la presente investigación .

Al Msc. Ing. Edward León Palacios, por su orientación y consejos durante mi etapa de formación profesional y por las sugerencias para la realización de la presente investigación.

Al Ing. Luis A. Vargas Moreno, por los conceptos básicos brindados durante mi etapa de formación profesional y por las sugerencias para la realización de la presente investigación.

A los amigos que me apoyaron con las ideas y consejos para la realización de la presente investigación.

Marcelo Gamboa, Russel
UNSCH
Ayacucho,

Contenido

Resumen	a
Introducción	c
Dedicatoria	d
Agradecimientos	e
Índice de Figuras	VI
Índice de Cuadros	X
Glosario	XII
Acrónimos	XIV
símbolos	XVI
1 Planteamiento del Problema.	1
1.1 Descripción del problema.	1
1.2 Delimitación del problema.	3
1.2.1 Espacial.	3
1.2.2 Temporal.	3
1.2.3 Temática y unidad de análisis.	3
1.3 Formulación del Problema.	3
1.3.1 Problema general.	4
1.3.2 Problemas específicos.	4
1.4 Justificación e importancia.	5
1.5 Limitaciones de la investigación.	6
1.6 Objetivos.	7
1.6.1 Objetivo general.	7
1.6.2 Objetivos específicos.	7



2 Marco teórico.	8
2.1 Antecedentes.	8
2.1.1 Investigaciones internacionales.	8
2.1.2 Investigaciones nacionales.	9
2.2 Bases teóricas.	9
2.2.1 Criterio de diseño de funcionalidad continua.	9
2.2.2 Criterios de rendimiento para la funcionalidad continua.	11
2.2.2.1 Niveles de calificación adoptados del REDi™	11
2.2.3 Requisitos de diseño de estructuras elásticas para la funcionalidad continua de edificios para la realidad Peruana	13
2.3 Marco conceptual.	15
2.3.1 Sistemas de control de respuestas sísmicas.	15
2.3.2 Clasificación de las técnicas de control de respuesta sísmica.	17
2.3.3 Sistemas de aislamiento sísmico.	19
2.3.3.1 Aisladores elastoméricos.	19
2.3.3.2 Aisladores deslizantes.	20
2.3.3.3 Tipo de aislador de la presente investigación.	21
2.3.4 Ecuación de movimiento y conceptos de energía.	22
2.3.4.1 Ecuación diferencial de movimiento en estructuras aisladas.	22
2.3.4.2 Conceptos de energía en estructuras.	24
2.3.5 Sistema de aislamiento de tipo péndulo de fricción.	26
2.3.6 Modelos de fuerzas-desplazamiento de aisladores.	28
2.3.6.1 Modelado de unidades aisladoras deslizantes.	28
2.3.7 Aisladores de triple péndulo de fricción.	30
2.3.8 Modelo de las 5 fases para el aislador FPT.	32
2.3.8.1 Fase de Deslizamiento I.	33
2.3.8.2 Fase de deslizamiento II	36
2.3.8.3 Fase de deslizamiento III.	37
2.3.8.4 Fase de deslizamiento IV.	39
2.3.8.5 Fase de deslizamiento V.	41
2.3.9 Modelado numérico del aislador de triple péndulo friccional.	44
2.3.9.1 Modelo en serie de tres elementos de péndulo friccional simple.	44
2.3.10 Efecto $P - \Delta$ en aisladores triple péndulo de fricción.	46



2.3.11	Propiedades para aisladores triple péndulo de fricción.	47
2.3.11.1	Configuración de las unidades de aislación.	47
2.3.11.2	Características geométricas.	48
2.3.11.3	Capacidad de restitución.	53
2.3.11.4	Capacidad de Desplazamiento.	53
2.3.12	Contacto con el Fabricante del Aislador FPT.	55
2.3.12.1	Nomenclatura que Identifica el Aislador FPT.	56
2.3.13	Análisis sísmico.	57
2.3.13.1	Definiciones:	58
2.3.13.2	Capacidad de restitución.	59
2.3.13.3	Factores de modificación de propiedades del sistema de aislamiento.	60
2.3.14	Movimiento Sísmico	61
2.3.14.1	Peligro Sísmico y Espectros de respuesta	61
2.3.14.2	Registros de aceleración sísmica.	61
2.3.15	Procedimientos de análisis.	61
2.3.16	Procedimiento de fuerza lateral equivalente.	62
2.3.16.1	Desplazamientos laterales mínimos requeridos para el dise- ño.	62
2.3.16.2	Fuerzas laterales mínimas requeridas para el diseño.	63
2.3.17	Procedimiento de análisis del historial de respuestas.	64
3	Método de la investigación.	66
3.1	Enfoque.	66
3.2	Alcance.	66
3.3	Diseño de investigación.	67
3.4	Población y muestra.	67
3.4.1	Población.	67
3.4.2	Muestra del estudio.	67
3.5	Hipótesis.	68
3.5.1	Hipótesis general.	68
3.5.2	Hipótesis específicas.	68
3.6	Operacionalización de variables.	68
3.6.1	Variables.	68



3.6.2	Indicadores	69
3.7	Técnicas e instrumentos.	70
3.8	Técnicas estadísticas para el procesamiento de la información.	71
3.9	Desarrollo del trabajo de tesis.	71
3.9.1	Aplicación de la funcionalidad continua en una edificación esencial.	72
3.9.2	Unidades Productoras de Servicios de Salud (UPSS)	74
3.9.3	Materiales y Elementos Estructurales	75
3.9.4	Objetivos para el desempeño sísmico para la estructura.	77
3.9.5	Espectro de diseño y espectro máximo considerado MCER.	78
3.9.6	Acelerogramas seleccionados.	80
3.9.7	Espectros de respuesta elásticos.	80
3.9.8	Escalado de los registros sísmicos.	82
3.9.9	Propiedades del aislador para el caso de estudio.	85
3.9.10	Análisis de Fuerza Lateral Equivalente.	87
3.9.10.1	Cálculo del desplazamiento máximo D_M	87
3.9.10.2	Desplazamiento total máximo y cortante basal de diseño	91
3.9.11	Análisis de respuesta en el tiempo.	92
3.9.12	Propiedades del elemento tipo Link/Support ETABS V16.	92
3.9.12.1	Propiedades principales.	93
3.9.12.2	Propiedades direccionales U1.	94
3.9.12.3	Propiedades direccionales U2 y U3.	94
3.9.13	Consideraciones del análisis sísmico de respuesta en el tiempo.	99
3.9.14	Modelamiento geométrico	101
3.9.15	Análisis lineal de respuesta en el tiempo base fija.	104
3.9.16	Análisis no lineal de respuesta en el tiempo base aislada.	106
4	Resultados y Discusión	110
4.1	Análisis e interpretación.	110
4.1.1	Resultados del análisis sísmico con base fija	110
4.1.1.1	Desplazamientos y distorsión de entrepiso	110
4.1.2	Resultados del análisis sísmico con base aislada.	113
4.1.2.1	Desplazamientos y distorsión de entrepiso Upper Bound.	113
4.1.2.2	Desplazamientos y distorsión de entrepiso Lower Bound.	115
4.1.3	Análisis del desplazamiento en la base.	117



4.1.4	Análisis de desplazamientos promedio.	119
4.1.5	Análisis de la distorsión de entrepiso Δ promedio.	122
4.1.6	Análisis de las aceleraciones máximas de piso.	124
4.1.7	Análisis de las aceleraciones máximas de piso promedio.	131
4.1.8	Incidencia del costo de aisladores con respecto al costo directo total.	134
4.2	Contrastación de hipótesis	135
4.2.1	Hipótesis General	135
4.2.2	Hipótesis específicas.	135
5	Conclusiones.	139
5.1	Conclusiones.	139
5.2	Recomendaciones.	140
5.3	Trabajos futuros.	141
	Referencias Bibliográficas	143
	ANEXOS	148
A	Memoria de cálculo desarrollado en Mathcad Prime V4.0.	149
A.1	Fase III del deslizamiento para el aislador de triple péndulo de fricción.	149
A.2	Análisis de fuerza lateral equivalente.	156
A.3	Cálculo de las propiedades Link/Support FPT 8827/14-12/10-6.	162
B	Planos de la muestra Hospital de Coracora ubicado en el distrito de Coracora, Provincia de Prinacochas, Departamento de Ayacucho.	167

Índice de Figuras

Figura 2.1:	Comparación de respuesta sísmica de edificio sin aislación y con aislamiento.	16
Figura 2.2:	Masificación de edificios sísmicamente aislados en Japón.	17
Figura 2.3:	Sistema de aislamiento sísmico en la base	19
Figura 2.4:	Aislador tipo LRB	20
Figura 2.5:	Aislador de tipo Péndulo Friccional	21
Figura 2.6:	Esquema y Modelo Dinámico del sistema considerado	22
Figura 2.7:	Modos de Vibración	24
Figura 2.8:	Energía en un sistema estructural	25
Figura 2.9:	Comportamiento Fuerza-Desplazamiento rígido-lineal de aisladores FP	29
Figura 2.10:	Aislador Triple Péndulo Friccional	31
Figura 2.11:	Sección transversal del aislador FPT	31
Figura 2.12:	Régimen del movimiento durante la fase I	33
Figura 2.13:	Diagrama de Cuerpo libre Fase I	34
Figura 2.14:	Relación fuerza-desplazamiento durante la Fase I	35
Figura 2.15:	Régimen del movimiento durante la fase II	36
Figura 2.16:	Relación fuerza-desplazamiento durante la Fase II	37
Figura 2.17:	Régimen del movimiento durante la fase III	37
Figura 2.18:	Relación fuerza-desplazamiento durante la Fase III	38
Figura 2.19:	Régimen del movimiento durante la fase IV	39
Figura 2.20:	Relación fuerza-desplazamiento durante la Fase IV	40
Figura 2.21:	Régimen del movimiento durante la fase V	41
Figura 2.22:	Relación fuerza-desplazamiento durante la Fase V	42
Figura 2.23:	Tres elementos simples de FP en serie	45

Figura 2.24:	Modelo en serie de FPT en ETABS	45
Figura 2.25:	Relacion Fuerza-Desplazamiento de tres elementos simples de FP en serie	46
Figura 2.26:	Detalle de la interfaz de aislación	48
Figura 2.27:	Efecto de la temperatura en las propiedades de fricción.	52
Figura 2.28:	Nomenclatura del aislador FPT	55
Figura 2.29:	Vista en planta del aislador FPT	57
Figura 2.30:	Sección transversal del aislador FPT	57
Figura 2.31:	Terminología del sistema de aislación y desplazamientos	59
Figura 2.32:	Fuerza de restitución en aisladores FPT que opera en la fase III	60
Figura 3.1:	Configuración estructural piso 1	73
Figura 3.2:	Configuración estructural piso 2	74
Figura 3.3:	Elevación general de la estructura	74
Figura 3.4:	Cálculo de valores para el espectro de diseño y MCER	79
Figura 3.5:	Espectro MCER y espectro de diseño	79
Figura 3.6:	Espectro de aceleraciones de los pares seleccionados	81
Figura 3.7:	Espectro de Aceleraciones SRSS de los pares seleccionados	81
Figura 3.8:	Espectro de diseño DBE, MCER y promedio SRSS	82
Figura 3.9:	Importación del registro a escalar en el SeismoMatch	83
Figura 3.10:	Espectro objetivo y parámetros de escala	83
Figura 3.11:	Resultado y comparación del componente escalado	84
Figura 3.12:	Espectro de aceleraciones SRSS escalado al espectro MCER	84
Figura 3.13:	Vista en planta del aislador FPT	86
Figura 3.14:	Sección transversal del aislador FPT	86
Figura 3.15:	Diagrama de Histeresis Fase III para $u=10.5$ in	88
Figura 3.16:	Diagrama de histeresis de la fase III	90
Figura 3.17:	Masa del Aslador Vs Diametro del deslizador rígido	94
Figura 3.18:	Ingreso de Propiedades Principales	98



Figura 3.19:	Ingreso de Propiedades Direccionales U1	98
Figura 3.20:	Ingreso de Propiedades lineales y no lineales para U2 y U3	99
Figura 3.21:	Modelo Geométrico Final	100
Figura 3.22:	Propiedades de Materiales para el Diseño	101
Figura 3.23:	Sección Columna Definida	102
Figura 3.24:	Modelado de la edificación	102
Figura 3.25:	Patrones de Carga establecidos	103
Figura 3.26:	Configuración para el Metrado de Cargas	103
Figura 3.27:	Modelo Geométrico Final	104
Figura 3.28:	Importación de la componente EO al ETABS	105
Figura 3.29:	Caso de Análisis 1	105
Figura 3.30:	Caso de Análisis 2	106
Figura 3.31:	Configuración de la Función Tipo Rampa	107
Figura 3.32:	Casos de Carga para el Análisis Sísmico Aislado	107
Figura 3.33:	Configuración de la Función Tipo Rampa	108
Figura 3.34:	Configuración Caso 1 de Análisis	108
Figura 3.35:	Configuración Caso 1 de Análisis	109
Figura 3.36:	Proceso de Ejecución del Análisis Sísmico Aislado	109
Figura 4.1:	Desplazamientos Promedio Caso 1 Dirección X	120
Figura 4.2:	Desplazamientos Promedio Caso 1 Dirección Y	120
Figura 4.3:	Desplazamientos Promedio Caso 2 Dirección X	121
Figura 4.4:	Desplazamientos Promedio Caso 2 Dirección Y	121
Figura 4.5:	Control de Distorsión de Entrepiso Promedio UB, Caso 1	123
Figura 4.6:	Control de Distorsión de Entrepiso Promedio UB, Caso 2	123
Figura 4.7:	Control de Distorsión de Entrepiso Promedio LB, Caso 1	124
Figura 4.8:	Control de Distorsión de Entrepiso Promedio LB, Caso 2	124
Figura 4.9:	Aceleraciones de Piso (g) - Promedio UB	133



Figura 4.10: Aceleraciones de Piso (g) - Promedio LB 133

Índice de Cuadros

Cuadro 2.1: Niveles de calificación REDi.	11
Cuadro 2.2: Principios rectores de los niveles de calificación REDi TM	12
Cuadro 2.3: Clasificación de las Técnicas de Control de Respuesta Sísmica	18
Cuadro 2.4: Variables e Indicadores del Estudio	43
Cuadro 2.5: Parámetros del modelo en serie del aislador FPT	46
Cuadro 2.6: Dimensión estandar de placas concavas en aisladores FPS	50
Cuadro 2.7: Valores para B_M en el amortiguamiento efectivo β_M	63
Cuadro 3.1: Variables e Indicadores del estudio	70
Cuadro 3.2: Propiedad de los Materiales	75
Cuadro 3.3: Dimensión de los Elementos Estructurales del Edificio	76
Cuadro 3.4: Cargas Muertas y Vivas	76
Cuadro 3.5: Registros sísmicos seleccionados	80
Cuadro 3.6: Propiedades de Fricción del aislador FPT	87
Cuadro 3.7: Resumen de cálculos para el Método Estático Equivalente	90
Cuadro 3.8: Fuerza Cortante V_b	91
Cuadro 3.9: Fuerza Cortante V_s	91
Cuadro 3.10: Límites establecidos para V_s	92
Cuadro 3.11: Propiedades Principales	96
Cuadro 3.12: Propiedades Direccionales U1	96
Cuadro 3.13: Propiedades Lineales Direccionales U2 y U3	96
Cuadro 3.14: Propiedades No Lineales Direccionales U2 y U3, Upper Bound	97
Cuadro 3.15: Propiedades No Lineales Direccionales U2 y U3, Lower Bound	97
Cuadro 4.1: Desplazamientos y distorsión de entrepiso, base fija	111
Cuadro 4.2: Desplazamientos y distorsión de entrepiso, Upper Bound	113



Cuadro 4.3:	Desplazamientos y distorsión de entrepiso, Lower Bound . . .	115
Cuadro 4.4:	Capacidad de Desplazamiento	117
Cuadro 4.5:	Desplazamiento máximo del Aislador FPT	118
Cuadro 4.6:	Control de Desplazamiento del Aislador	118
Cuadro 4.7:	Desplazamiento Promedio Base Fija	119
Cuadro 4.8:	Desplazamiento Promedio Base Aislada	119
Cuadro 4.9:	Distorsión de Entrepiso Promedio, Base Fija	122
Cuadro 4.10:	Distorsión de Entrepiso Promedio, Base Aislada UB	122
Cuadro 4.11:	Distorsión de Entrepiso Promedio, Base Aislada LB	123
Cuadro 4.12:	Análisis de aceleraciones máximas de piso (g).	124
Cuadro 4.13:	Aceleraciones de Piso (g) - Promedio, Base Fija	132
Cuadro 4.14:	Aceleraciones de Piso (g) - Promedio, Base Aislada UB	132
Cuadro 4.15:	Aceleraciones de Piso (g) - Promedio, Base Aislada LB	133
Cuadro 4.16:	Costo directo total	134
Cuadro 4.17:	Costo de aisladores sísmicos FPT 8827/14-12/10-6	134
Cuadro 4.18:	Porcentaje de incidencia	134
Cuadro 4.19:	Porcentaje de variación en distorsiones, Base Fija-UB-CASO 1	137
Cuadro 4.20:	Porcentaje de variación en distorsiones, Base Fija-LB-CASO 1	137
Cuadro 4.21:	Porcentaje de variación en aceleraciones, Base Fija-UB-CASO 1	138
Cuadro 4.22:	Porcentaje de variación en aceleraciones, Base Fija-LB-CASO 1	138

Glosario

- **Funcionalidad:** Es la adecuación de la forma externa y de la estética de una cosa, a la función que debe desempeñar. Para la presente investigación, es la propiedad o atributo de poder desempeñar las funciones para el cual fue adecuado o diseñado una edificación.
- **Continua:** Que no muestra interrupciones.
- **Nivel de Umbral:** Fuerza mínima para que la superestructura inicie a oscilar producto de un sismo o fuerzas de viento.
- **Recentrado:** Proceso mediante el cual el aislador regresa a su posición original.
- **Deslizamiento:** Característica de la forma en como se desempeña un aislador friccional.
- **Delimitación:** enfocar en términos concretos nuestra área de interés, especificar sus alcances, determinar sus límites.
- **Post-terremoto:** Estado o situación luego de sucedido un terremoto
- **Daño:** Supone un perjuicio en los derechos, bienes o intereses de un individuo.
- **Sismos:** Serie de vibraciones de la superficie terrestre generadas por un movimiento brusco y repentino de las capas internas (corteza y manto).
- **Resiliencia:** la capacidad de una organización o comunidad para recuperarse rápidamente después de un gran terremoto en el futuro
- **Prescriptivas:** Aquellos textos cuyo mensaje se emite con el fin de regular o guiar el comportamiento del receptor
- **Holístico:** La holística es aquello perteneciente al holismo, una tendencia o corriente que analiza los eventos desde el punto de vista de las múltiples interacciones que los caracterizan.
- **LEED:** Es un sistema de certificación de edificios sostenibles, desarrollado por el Consejo de la Construcción Verde de Estados Unidos.

- Aislamiento Sísmico: Es una colección de elementos estructurales para desacoplar una superestructura del edificio del suelo y así proteger la integridad del edificio.
- Desacoplar: Separar lo que estaba junto.
- Superestructura: elementos estructurales que se encuentran por encima del nivel del sistema de aislamiento.
- Deslizamiento Friccional: efecto que se produce entre dos superficies rugosas.
- Fricción: Relacionada con las fuerzas de rozamiento en una superficie rugosa.
- Teflón: Acero revestido de Politetra Fluoro Etileno (PTFE)
- PTFE: El politetrafluoroetileno, conocido comúnmente como teflón, es un polímero de comportamiento viscoelástico que se utiliza en la fabricación de aisladores de péndulo de fricción.
- Disipada: Acción de disipar, hacer desaparecer una cosa poco a poco por la disgregación y dispersión de sus partes.
- Histéresis: tendencia de un material a conservar sus propiedades, en ausencia del estímulo que la ha generado.

Acrónimos

- FPS: Sistema de Péndulo de Fricción
- SEAOC: Structural Engineers Association of California (Asociación de Ingenieros Estructurales de California)
- UBC: Uniform Building Code (Código de Construcción Uniforme)
- ASCE: American Society of Civil Engineers (Sociedad Americana de Ingenieros Civiles)
- OMS: Organización Mundial de la Salud
- MINSA: Ministerio de Salud
- INDECI: Instituto Nacional de Defensa Civil
- FPT: Triple Péndulo de Fricción
- ETABS: Extended Three Dimensional Analysis of Building Systems (Análisis Tridimensional Extendido de Edificaciones)
- FP: Péndulo de Fricción
- REDi: Resilience based Earthquake Design Initiative (Diseño de Terremotos basada en Resiliencia)
- MEP: Equipos Mecánicos, eléctricos y de plomería.
- LEED: Sigla de Leadership in Energy and Environmental Design en español (Directiva en energía y diseño ambiental)
- ISO: International Organization for Standardization (Organización Internacional de Normalización)
- PTFE: Politetra Fluoro Etileno
- EERC: Earthquake Engineering Research Center (Centro de Investigación de Ingeniería de Terremotos)

- NCEER: National Center for Earthquake Engineering Research (Centro Nacional de Investigación en Ingeniería de Terremotos)
- MFPS: Multiple Friction Pendulum System (Sistema de Péndulo de Fricción Múltiple)
- DBE: Design Basis earthquake (Terremoto o sismo de diseño)
- MCE: Maximum Considered Earthquake (Terremoto o sismo máximo considerado)
- SFP: Simple Frictional Pendulums (Péndulos friccionales simples)
- LB: Lower Bound (Límite inferior)
- UB: Upper Bound (Límite superior)
- EPS: Earthquake Protection Systems (Sistemas de protección contra terremotos)
- SRSS: Square Root Sum of Squares (Raíz cuadrada de la suma de cuadrados)
- ELF: Equivalent Lateral Force (Fuerza Lateral Equivalente)
- NLRHA: Nonlinear Response History Analysis (Análisis de historia de respuesta no lineal)
- EO: Este-Oeste
- NS: Norte-Sur

Símbolos

R_i	—	Radio de curvatura de la superficie i
h_i	—	Distancia radial entre el punto pivote y la superficie i
d_i	—	Capacidad de desplazamiento i
μ_i	—	Coefficiente de fricción de la superficie de deslizamiento i
i	—	Varía de 1 a 4 por la existencia de 4 superficies
R_{effi}	—	Radio de curvatura efectivo de la superficie i
F_{fi}	—	Fuerza de fricción de la superficie i
W	—	Peso de la edificación
S_i	—	Fuerza de reacción de la superficie i
D_M	—	Desplazamiento máximo
D_c	—	Diámetro de las superficies cóncavas externas
D_S	—	Diámetro del aislador interno
D_R	—	Diámetro del deslizador rígido
h_R	—	Altura del deslizador rígido
S_{DS}	—	Aceleración de respuesta espectral para el sismo de diseño DBE
S_{MS}	—	Aceleración de respuesta espectral para el sismo considerado máximo MCER
B_M	—	Coefficiente numérico para el amortiguamiento efectivo
β_M	—	Amortiguamiento efectivo
K_M	—	Rigidez efectiva del sistema de aislación
E_M	—	Energía disipada en un ciclo de histéresis
g	—	Gravedad
D_{TM}	—	Desplazamiento máximo total
V_b	—	Cortante de diseño para elementos por debajo del nivel de aislamiento
V_s	—	Cortante de diseño para elementos por encima del nivel de aislamiento
Δ_x	—	Distorsión o deriva de entrepiso en la dirección x
Δ_y	—	Distorsión o deriva de entrepiso en la dirección y

Planteamiento del Problema.

En este capítulo presentamos la descripción, delimitación y formulación del problema, además de establecer los objetivos de la presente tesis.

1.1 Descripción del problema.

A lo largo de la historia, el hombre siempre ha querido disminuir el riesgo de los fenómenos naturales hacia su integridad física y el de la sociedad que lo rodea. Varios de estos desastres naturales son casi incontrolables; pero los sismos son los más comunes, ya que casi la mitad de las grandes ciudades del mundo están ubicadas en zonas propensas a estos, causando daños principalmente en las edificaciones. A pesar de esto, actualmente los efectos de los sismos se pueden controlar de manera tan efectiva al punto de casi no sentirlos, gracias a unos dispositivos llamados aisladores sísmicos. (*Miller, 2013*)

En los Estados Unidos, el sistema de aislamiento más comúnmente utilizado es el caucho de plomo, aisladores elastoméricos laminados multicapa con tapones de plomo insertado en uno o más agujeros circulares. El segundo tipo de sistema de aislamiento más común utiliza elementos deslizantes, el Sistema de Péndulo de Fricción (FPS) es un sistema de aislamiento deslizante donde el peso de la estructura se lleva en superficies de deslizamiento esféricas que se deslizan el uno al otro cuando el movimiento del suelo excede un nivel de umbral¹. La acción de recentrado es generada al levantar el edificio cuando se produce deslizamiento en la superficie esférica. Desarrollado en 1986 por Victor Zayas. (*Victor Zayas, Low & Mahin, 1987*)

En cuanto a la evolución de la normativa va surgiendo de diversos estudios y ensayos, en Estados Unidos el proceso de la elaboración de códigos que incluyeran pautas para

¹Fuerza mínima para que la superestructura inicie a oscilar producto de un sismo o fuerzas de viento

el diseño con aisladores sísmicos empezó con una simple publicación de la Asociación de Ingenieros estructurales del Norte de California llamada “Tentative Seismic Isolation Design Requirements” (SEAOC 1986). En el año 1990 los miembros del comité sismológico del SEAOC deciden incluir en su “Blue Book”, un apéndice con los requerimientos de “General Requirements for the Design and Construction of Seismic Isolated Structures”.

En el caso de Sudamérica, Chile ha sido uno de los primeros países en incorporar aisladores sísmicos a sus estructuras. Cuenta además con la norma Chilena NCh2745 – 2003 que es el resultado de la adaptación a la realidad chilena del código UBC (Uniform Building Code) del año 1997 y su compatibilización con la norma chilena NCh433.Of1996.

En el peru, estos ultimos años se ha venido incorporando aisladores sismicos en estructuras sin contar con una normativa propia para el diseño de este tipo de estructuras, sin embargo en la norma tecnica E-030 ²(E030, 2018). Se hace referencia en el numeral 3.9 *Sistemas de Aislamiento sísmico y sistemas de Disipación de Energía*, recomendando el empleo de los requisitos del ASCE/SEI 7-10³ (ASCE, 2010) Capítulo 17, *Requisitos de Diseño Sísmico para Estructuras Sísmicamente Aisladas*". Actualmente se encuentra en elaboración el proyecto de norma de aislamiento sísmico E-031, el cual definirá los lineamientos para el diseño sismico de estructuras aisladas, esta norma sera una adaptación de la ASCE/SEI 16 a la realidad del Perú. (Casabonne, 2017)

El análisis de los aisladores sísmicos de base con funcionalidad continua viene siendo desarrollado por el PhD Ing. VICTOR ZAYAS quien es el inventor del Friction Pendulum System (Sistema de Péndulo de Fricción), un concepto de diseño sísmico que previene confiablemente el colapso de la estructura y minimiza el daño sísmico, la interrupción y las pérdidas económicas. En 2006, Victor avanzó aún más el aislamiento sísmico con la invención del Triple Péndulo, que viene a ser el primer sistema de aislamiento sísmico de múltiples etapas.(EPS, 2017)

En estos ultimos años se viene difundiendo el diseño para la funcionalidad continua que es lo que la presente investigación propone realizar empleando aisladores de base de triple péndulo friccional.

²"Diseño Sismorresistente del Reglamento Nacional de Edificaciones"

³American Society of Civil Engineers "Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures"

1.2 Delimitación del problema.

1.2.1 Espacial.

La investigación que se propone está aplicado al nuevo hospital de Coracora, distrito de Coracora, provincia de Parinacochas, departamento de Ayacucho.

1.2.2 Temporal.

Los datos que serán considerados para la realización del trabajo de investigación propuesto serán enmarcados dentro del periodo 1987 - 2017 considerando la temática de aisladores triple péndulo de fricción y funcionalidad continua, esto será obtenido a través de fuentes secundarias. El proyecto de Tesis se elaboró en el periodo de enero de 2018 a diciembre de 2018.

1.2.3 Temática y unidad de análisis.

La presente investigación presenta el análisis sísmico de una edificación esencial para la funcionalidad continua, teniendo en consideración cuando la estructura tiene base fija o convencional y cuando la misma estructura tiene sistema de aislación de triple péndulo friccional.

La unidad del objeto de estudio de la investigación son los parámetros establecidos para la funcionalidad continua entre los cuales se encuentran las derivas o distorsiones de entrepiso y las aceleraciones de piso.

1.3 Formulación del Problema.

Es de interés internacional la protección de la vida de los seres humanos por esto, la Organización Mundial de la Salud en su directiva (*CD50.R15, 2010*) aprueba el Plan de Acción de Hospitales Seguros, en la cual se establece de que los nuevos hospitales deben ser diseñados y construidos para mantener su capacidad máxima de funcionamiento después de un terremoto. Estas directivas de la Organización Mundial de la Salud para la funcionalidad post-terremoto en hospitales han sido adoptadas por Estados Unidos y otros 193 países incluyendo la mayoría de los países latinoamericanos. (*zayas, 2017*)

Asimismo, el Perú adoptando esta directiva aprueba el Decreto Supremo N° 027-2017-MINSA, que en su artículo 1 decreta, la Aprobación de la Política Nacional de Hospitales Seguros Frente a los Desastres. "Siendo el principal instrumento orientador de la gestión de riesgo de desastre, en los establecimientos de salud, para garantizar su funcionamiento con el máximo de su capacidad y en su misma infraestructura, durante y después de un evento sísmico, cumpliendo de esa manera el deber del estado de proteger la vida de la población de manera permanente, incluso inmediatamente después de un desastre". (DS-027-2017-MINSA, 2017)

Por tanto, al ser los hospitales infraestructuras esenciales se requiere que los daños que pueda sufrir durante un evento sísmico sean mínimos, de tal manera que sigan operando normalmente, sin ver afectadas sus capacidades de prestación de servicios.

En este contexto, la presente investigación propone realizar un diseño sísmico con criterios de diseño para la funcionalidad continua, desarrollada para una estructura de base fija o convencional y la misma estructura para base con aisladores de triple péndulo de fricción, con la finalidad de analizar los criterios de funcionalidad continua para ambos casos, la cual se describe en los capítulos siguientes.

De lo que se ha descrito se presentan las interrogantes de investigación:

1.3.1 Problema general.

¿De qué manera se puede reducir los daños de los elementos estructurales y no estructurales de un hospital para garantizar su operatividad, sin ver afectadas sus capacidades de prestación de servicios después de ocurrido un sismo de alta intensidad?

1.3.2 Problemas específicos.

1. ¿Podría una estructura con base fija cumplir las condiciones de funcionalidad continua?
2. ¿Como afecta la implementación del aislador de triple péndulo friccional en la estructura?
3. ¿Cuál es la diferencia en el comportamiento dinámico de una estructura con base fija y base aislada?

1.4 Justificación e importancia.

Al examinar y analizar los daños sufridos por algunas estructuras luego de un evento sísmico, se puede concluir que los terremotos representan uno de los mayores problemas que se deben considerar. La vulnerabilidad de las estructuras, depende de los posibles daños que puedan sufrir sus elementos estructurales más importantes ante un sismo, lo cual repercute en el comportamiento de todo el sistema. Los desastres producidos por los sismos generan grandes pérdidas humanas y económicas, es por ello la importancia social, económica y los efectos catastróficos que pueden producirse en el caso de colapso de estructuras.

En el terremoto de Pisco - Perú de 2007, de acuerdo una evaluación de los establecimientos de salud, efectuada por las Direcciones Regionales de Salud de Ica y Huancavelica y las Direcciones Provinciales de Salud de las zonas afectadas, estableció que 84 establecimientos habían sido afectadas lo que representa el 32 % del total de ellos, 6 fueron totalmente destruidos y 5 tuvieron daños severos. Una evaluación de los daños a los establecimientos de salud en todas las Regiones, publicada por el INDECI, identificó 112 establecimientos afectados, de los cuales 14 fueron destruidos. A fin de emprender la recuperación de las actividades vitales y productivas, es fundamental que ciertas edificaciones puedan funcionar inmediatamente después de un terremoto. Hospitales, estaciones de bomberos y policía, son algunas de ellas.

La investigación se justifica por las siguientes razones:

- Esta investigación se justifica y es necesaria porque nos va a permitir conocer un criterio de diseño con el cual se contribuye a diseñar estructuras esenciales como es un hospital, que ante un evento sísmico, sus daños estructurales y no estructurales sean mínimos.
- La investigación se justifica y es necesaria porque permite conocer el comportamiento dinámico de una estructura aislada en la base frente a un sismo, considerando criterios de diseño de funcionalidad continua.

La investigación es importante por las siguientes razones:

- Es importante ya que constituye una tarea social, si implementamos el criterio de diseño planteado en el diseño de las estructuras esenciales como son los hospitales, podremos evitar mayores pérdidas humanas frente a un sismo.

- Es importante en el aspecto económico ya que al diseñar con el criterio de funcionalidad continua podremos limitar los daños sísmicos, evitando así efectos catastróficos que pueden producirse como es el caso de colapso de estructuras.

La metodología plantea un análisis dinámico con criterios de funcionalidad continua teniendo el aislador de base de péndulo de fricción triple. y conocer el comportamiento de este Sistema ante un evento sísmico.

Al poder conocer las propiedades dinámicas y los efectos ante una fuerza sísmica; podremos determinar si se cumplen los parámetros de funcionalidad en la estructura, lo que generara mayor seguridad y garantizar el funcionamiento inmediato de estructuras vitales como son los hospitales, luego de un sismo.

Utilidad Metodológica: La investigación da a conocer las ventajas de un análisis estructural considerando criterios de funcionalidad continua, teniendo en cuenta aisladores de base de péndulo de fricción triple, frente a una estructura convencional.

Valor teórico: Es importante conocer y entender como responden las estructuras convencionales y aisladas empleando el criterio de diseño de funcionalidad continua; para ello se determinará el comportamiento de una edificación esencial como es un hospital, sometido a cargas sísmicas.

Por lo tanto, la presente tesis es fundamental por que enfocamos el diseño sismoresistente de una edificación aislada aplicando criterios de funcionalidad continua con el objeto de minimizar los daños estructurales y no estructurales debido a los sismos en una estructura.

1.5 Limitaciones de la investigación.

Las limitaciones de la investigación principalmente están relacionadas al tamaño de muestra donde se realizará la aplicación de la investigación que es el Hospital de Coracora que constituye una edificación esencial y para un tipo de aislador triple péndulo friccional FPT 8827/14-12/10-6.

1.6 **Objetivos.**

1.6.1 **Objetivo general.**

Desarrollar el análisis sísmico de la estructura con criterios de diseño de funcionalidad continua, para lo cual usaremos aisladores de base tipo triple péndulo de fricción FPT 8827/14-12/10-6, con el fin de reducir el nivel de daños estructurales y no estructurales en una edificación esencial como es un hospital.

1.6.2 **Objetivos específicos.**

1. Realizar un análisis sísmico de la edificación usando una herramienta de cálculo como es el software ETABS V16.2.2. Teniendo en cuenta que se tiene base fija y criterios de diseño de funcionalidad continúa para conocer el comportamiento de la estructura.
2. Considerar aisladores sísmicos en la estructura y realizar un análisis sísmico de la edificación usando una herramienta de cálculo como es el software ETABS V16.2.2. Teniendo en cuenta que se tiene aisladores de base de tipo triple péndulo de fricción 8827/14-12/10-6 y criterios de diseño de funcionalidad continúa para conocer el comportamiento dinámico de la estructura.
3. Comparar los resultados obtenidos para la estructura convencional de base fija y la misma estructura aislada con el aislador FPT 8827/14-12/10-6.

Marco teórico.

2.1 Antecedentes.

En el presente capítulo se desarrollan los antecedentes de investigaciones internacionales y nacionales relacionados al tema de investigación de la presente tesis.

2.1.1 Investigaciones internacionales.

Dentro de las investigaciones internacionales encontramos los siguientes:

- (*zayas, 2017*), en la publicación "*Estándar de Aislamiento Sísmico para la Funcionalidad Continua*" es la principal investigación realizada sobre la funcionalidad continua, quien como resultado de los estudios realizados logra la publicación de un estandar en el que define la funcionalidad continua y los parámetros que la caracterizan.
- (*Victor Zayas et al. 1987*), en la publicación "*The FPS Earthquake Resisting System Experimental Report*" cuyos autores son Victor Zayas junto a Stanley Low y Stephen Mahin publican los resultados de estudios experimentales realizado a aisladores de sistema péndulo friccional cuya investigación fue desarrollada en la Universidad de California en Berkeley.
- (*V.A. Zayas, Constantinou & Al-Hussaini, 1994*), en la publicación "*Seismic Isolation of Multi-Story Frame Structures Using Spherical Sliding Isolation Systems*", cuya investigación experimental en 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 pisos en factores de 4 a 6, lo que permite que el sistema estructural superior permanezca elástico durante las fuertes cargas

sísmicas. Las reducciones en las desviaciones reducen significativamente el daño a componentes de edificios no estructurales y estructurales causados por los sismos a los cuales fue sometida la muestra.

- (Fenz & Constantinou, 2008a), en la publicación Development, “*Implementation and Verification of Dynamic Analysis Models for Multi-Spherical Sliding Bearings*”, 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.

Siendo estas las principales investigaciones desarrolladas a nivel internacional, principalmente desarrollados en la Universidad de Berkeley y Universidad Estatal de Nueva York conocida también como Universidad de Búfalo.

2.1.2 Investigaciones nacionales.

En el ámbito nacional se encuentra poca investigación en cuanto a funcionalidad continua y aisladores entre las cuales tenemos:

- (Martínez y Melgar, 2015), en su tesis “*Análisis, Comportamiento y Diseño de Edificaciones con Aisladores de Péndulo Friccional*”
- (Ruiz, 2017), en su tesis “*Análisis y Diseño de Edificios con Aisladores Sísmicos de Péndulo Friccional Doble y Triple*”

2.2 Bases teóricas.

2.2.1 Criterio de diseño de funcionalidad continua.

Los hospitales diseñados solo según la Norma Técnica E.030 (E030, 2018) no cumple con la ley peruana para la Funcionalidad Continua. Es necesario utilizar también criterios de diseño adicionales. Una solución ahora en uso generalizado es el criterio de funcionalidad continua. Las estructuras son diseñadas elásticamente, con límites especificados para las

derivas y aceleraciones en las estructuras. Aquí se expone el criterio de diseño para mantener la funcionalidad continua y satisfacer el decreto supremo (*DS-027-2017-MINSA, 2017*). Estos criterios de diseño limitarán, en promedio, los daños causados por los movimientos sísmicos a los componentes arquitectónicos, el contenido y la estructura, a menos del 2 % del costo de reemplazo¹. Para reducir los costos de construcción los códigos de diseño de estructura permiten diseñar estructuras para una pequeña fracción de las demandas sísmicas calculadas. El criterio de desempeño sísmico ASCE 7 propuesto para "Instalaciones Esenciales", usando los factores R permitidos, es limitar el riesgo de colapso a menos del 3 % al ocurrir el terremoto máximo considerado [ASCE 7-10 Tabla C.1.3.1b] (*ASCE, 2010*). Este criterio para "Ocupación Inmediata" consigue que las estructuras estén a salvo del colapso después de un terremoto, pero permite la presencia de daño. Los criterios ASCE 7 para "Instalaciones Esenciales" no fueron desarrollados para minimizar los daños y mantener la funcionalidad post terremoto. (*zayas, 2017*)

Por tanto el criterio de diseño de funcionalidad continua con la finalidad de reducir los daños, recomienda alcanzar los criterios de resiliencia platino u oro del REDiTM, por lo que adoptamos los criterios de rendimiento del REDi Rating System, (*REDiTM, 2013*).

La clasificación de Resiliencia Sísmica Platino del REDi^{TM2} proporciona guías de diseño y límites de daño sísmico para mantener la funcionalidad de las instalaciones esenciales inmediatamente después de un terremoto (*REDiTM, 2013*).

REDiTM se recomienda como la guía para las consideraciones relacionadas con la resiliencia de la energía eléctrica, agua y otras necesidades de infraestructura necesarias para las operaciones de la instalación después de un terremoto. Para instalaciones que contengan materiales o condiciones peligrosas, o que contengan equipos sensibles necesarios para las operaciones de la instalación o que requieran límites de daño más bajos, deberán desarrollarse evaluaciones de ingeniería específicas, pruebas de aislamiento y criterios de diseño que satisfagan los requisitos más estrictos. (*zayas, 2017*)

La funcionalidad continua se basa principalmente en tres consideraciones que se deben tomar en cuenta para el análisis sísmico de estructuras:

¹El costo de reparación de los daños causados por un sismo se reducen a menos de 2 % del costo total de la edificación

²REDi, Resilience-Based Design Initiative, traducido, Iniciativa de Diseño de Basada en Resiliencia

- a) Las estructuras se diseñaran elasticamente
- b) Se tiene un limite especificado de deriva de piso
- b) Control en las acelareciones en las estructuras

2.2.2 Criterios de rendimiento para la funcionalidad continua.

Los Criterios de Funcionalidad Continua Adopta los niveles de rendimiento o desempeño del Sistema de Calificación Platino del **REDi™ Rating System**. (*REDi™, 2013*) El cual se explica a continuación.

2.2.2.1 Niveles de calificación adoptados del REDi™

El marco REDi™ establece tres niveles de calificación, cada uno con objetivos de resiliencia que apuntan para reducir sustancialmente los riesgos de terremotos en relación con los objetivos del código para edificios comunes. Se denotan los niveles de calificación como Platino, Oro y Plata, en función del éxito de LEED³ en la elevación la relación de estas clasificaciones con un mayor rendimiento de la construcción entre las partes interesadas. Los objetivos de resiliencia asociados con el "terremoto de nivel de diseño"(que definimos como produciendo un temblor de tierra de 475 años de período de retorno) se muestran en el cuadro 2.1.

Cuadros 2.1: Niveles de calificación REDi.

clasificación	Re-ocupación	Recuperación funcional	perdidas financieras	Seguridad de ocupantes
Platino	Inmediato	<72 horas	<2.5 %	Lesiones poco probables
Oro	Inmediato	<1 mes	<5 %	Lesiones poco probables
Plata	<6 meses	<6 meses	<10 %	Posibles lesiones

(Fuente: (*REDi™, 2013*))

Los objetivos de recuperación funcional para Platino son generalmente consistentes con el objetivo de rendimiento previsto por el código para instalaciones esenciales. Las

³LEED (sigla de Leadership in Energy and Environmental Design) en español (Directiva en energía y diseño ambiental), es un sistema de certificación de edificios sostenibles, desarrollado por el Consejo de la Construcción Verde de Estados Unidos (US Green Building Council).

calificaciones Platino y Oro solo se pueden cumplir si el edificio no presenta reparaciones ya que es poco probable que puedan llevarse a cabo dentro del marco de tiempo de la recuperación funcional; una de las diferencias clave es que los edificios Platino requieren un sistema de respaldo en caso de interrupción del servicio mientras que la funcionalidad en edificios Oro se logra solo una vez que las utilidades son restauradas, la considerable brecha en los objetivos de recuperación entre Platino, Oro y La plata refleja que cualquier daño que requiera reparación demorará meses en completarse, y solo si las medidas de planificación están vigentes antes del terremoto para abordar los "factores obstaculizadores" que retrasan inicio de reparaciones. Debemos tener en cuenta que la recuperación funcional se relaciona con la recuperación de la comodidad normal del ocupante y las condiciones habitables (predefinidas por el establecimiento) junto con la reanudación de las funciones previstas del edificio. Ejemplos incluyen servicios de emergencia y servicios típicos en hospitales. Los límites de pérdida financiera para cada nivel se seleccionaron en función de varios estudios de diversos sistemas estructurales sometidos a un rango de intensidades sísmicas, se mostró que los plazos de recuperación de 6 meses o menos estaban relacionados con pérdidas financieras debajo del 10% (ver el Cuadro 2.1). (Almufti & Willford, 2014)

Los niveles de calificación se rigen por los siguientes principios rectores:

Cuadros 2.2: Principios rectores de los niveles de calificación REDi™

Platino

- Mejorar el diseño de la estructura y los componentes arquitectónicos de manera que la construcción y el contenido sufran solo un daño mínimo (estético).
- Proporcionar disposiciones de “más allá del código” para los sistemas de egreso y otras mejoras a la seguridad de los ocupantes.
- Proteja los componentes MEP y otros sistemas críticos, proporcione sistemas de respaldo. Esto permite operaciones continuas de funciones primarias en ausencia de utilidades.
- Pre-identificar planes de contingencia para proporcionar agua y eliminación de combustible y desechos o emplear alternativas tecnologías sin conexión a la red en caso de interrupción prolongada del servicio.
- Minimizar el riesgo de externalidades generalmente incontrolables que pueden afectar la funcionalidad, incluyendo restricciones de acceso al sitio y daño potencial por peligros externos tales como edificios circundantes.

Cuadros 2.2 – *Continúa de la página anterior*

Oro

- Mejorar el diseño de la estructura y los componentes arquitectónicos de manera que la construcción y el contenido sufran solo un daño mínimo (estético).
- Proporcionar disposiciones de “más allá del código” para los sistemas de egreso y otras mejoras a la seguridad de los ocupantes.
- Proteja los componentes MEP y otros sistemas críticos o garantice que sean reemplazados/reparados dentro de 1 mes. Esto permite que las operaciones normales se reanuden una vez que se restauran las utilidades.

Plata

- El daño al edificio puede resultar en una “Etiqueta amarilla” que evitaría la reoccidencia hasta que el edificio sea reparado.
- Proporcionar disposiciones de “más allá del código” para los sistemas de egreso y otras mejoras a la seguridad de los ocupantes.
- Se requiere un contratista calificado para hacer las reparaciones para restaurar el edificio a un estado que pueda apoyar la recuperación funcional dentro de los 6 meses. Puede ser necesario mitigar los “factores obstaculizadores” para cumplir con este objetivo de tiempo de inactividad.
- El edificio puede reanudar las operaciones normales solo una vez que se repare el edificio y se haya restaurado.

Adoptada de: (REDi™, 2013)

2.2.3 Requisitos de diseño de estructuras elásticas para la funcionalidad continua de edificios para la realidad Peruana

Para cumplir la expectativa de funcionalidad continua deberá emplearse tecnologías de control de daños como el aislamiento de base y los sistemas de disipación de energía.

Todos los edificios nuevos y otras estructuras que utilicen un método de diseño de aislamiento sísmico deberán satisfacer los criterios de Análisis Estructural, Capacidad de Desplazamiento del Aislador y Cargas Sísmicas de Diseño descritas a continuación.

- “Cargas Mínimas de Diseño para Edificios y Otras Estructuras”, como se especifica en la edición más reciente de la Normativa E020 “Cargas” (E020, 2006) complementado con el ASCE 7-10 y 16.
- Se emplearan los “Requisitos de Diseño Sísmico para Estructuras Sísmicamente Aisladas”, como se especifica en el Capítulo 17 de la edición más reciente de (ASCE, 2016)
- **El Coeficiente de Reducción de las Fuerzas Sísmica, R, para el diseño de todos los componentes de la estructura será $R = 1.0$.**
- Para edificios de las categorías **A⁴** y **B⁵** de riesgo sísmico: **las derivas máximas laterales sísmicas no excederán de 0.003 veces la altura del piso; Y las aceleraciones medias espectrales de piso con 5 % de amortiguamiento para el período comprendido entre 0 y 5 segundos, de los pisos ocupados, no excederán de 0.4 g⁶**, según lo determinado por el Procedimiento de Historia de Respuestas, realizado de acuerdo con ASCE 7-16 en su numeral 17.6.3.4. Estos criterios pretenden limitar el daño a los componentes arquitectónicos a menos del 2 % del costo de reemplazo de las instalaciones, para la respuesta media de edificios típicos de ese tipo.
- Estos criterios pretenden una confiabilidad⁷ del 90 % durante 50 años de evitar cualquier daño significativo a los componentes estructurales y limitar el valor medio del daño a los componentes arquitectónicos experimentados por las instalaciones típicas a valores inferiores a los especificados.
- Los aisladores y sus conexiones deberán satisfacer los requisitos de las Pruebas de Capacidad especificadas en el Estándar de Aislamiento Sísmico para la Funcionalidad Continua (zayas, 2017).
- Todos los aisladores que soporten la misma columna o muro de corte, deben ser del mismo tipo, número de modelo, capacidades y propiedades.
- Las deformaciones verticales del aislador que ocurren en el desplazamiento lateral DM no deberán diferir en más de 1 pulgada respecto a la medición durante los ensayos

⁴Categoría de Edificaciones Esenciales del numeral 3.1 de la norma técnica E-030

⁵Categoría de Edificaciones Importantes del numeral 3.1 de la norma técnica E-030

⁶las aceleraciones espectrales serán normalizadas a un máximo de 0.4g

⁷Probabilidad de que un sistema se comporte de tal modo que cumpla los objetivos para los cuales ha sido diseñado

de propiedades dinámicas, para todos los tipos o modelos aisladores instalados en la misma estructura.

- Las disposiciones de esta subsección no se aplican a los elementos estructurales ni al diseño estructural para el reforzamiento con aislamiento sísmico de los edificios existentes.

2.3 Marco conceptual.

2.3.1 Sistemas de control de respuestas sísmicas.

Si bien es preciso reconocer el excelente desempeño estructural de las edificaciones, no se puede concluir lo mismo en materia de protección de función, preservación de contenidos y percepción de la población. Por estas razones, resulta necesario promover el uso de tecnologías, probadas a nivel nacional e internacional y reconocidas por la comunidad profesional, orientadas a mejorar la respuesta sísmica de las estructuras, más allá de los requisitos mínimos de la normativa nacional vigente.

Durante su vida útil, las estructuras son sometidas a diversas sollicitaciones de servicio, como las provenientes de las cargas propias del uso del edificio y de fenómenos naturales. Entre estos últimos, las mayores demandas o sollicitaciones sobre una estructura son causadas, generalmente, por eventos sísmicos. Durante un sismo, la energía liberada en la fuente se propaga a través del suelo en forma de ondas. Esta energía, que es transmitida luego a las estructuras y sus contenidos, y que se manifiesta fundamentalmente como movimiento, aceleración y deformación de los componentes y sistemas estructurales y no estructurales, se disipa a través de daño de dichos componentes. (*CDT & CCHC, 2012*)

En el caso de edificios, la disipación de energía se produce típicamente en la interacción entre el suelo y las fundaciones, en el daño de elementos estructurales tales como muros, vigas, losas, columnas, encuentros viga-columna, conexiones, y en la interacción entre el sistema estructural y sistemas no estructurales, principalmente tabiques. El diseño sismorresistente convencional se fundamenta en la capacidad de las estructuras para disipar la energía que le entrega el sismo por medio de deformaciones inelásticas, las que como se ha mencionado anteriormente, implican un daño controlado de la estructura. Para alcanzar niveles de deformación compatibles con las demandas sísmicas, las estructuras

deben cumplir con los requisitos de detallamiento sísmico indicados en las normativas correspondientes a cada material.

En las últimas dos décadas ha ganado aceptación entre la comunidad profesional el uso de sistemas de protección sísmica en estructuras. Entre ellos, los sistemas de aislación sísmica y de disipación de energía han sido los más utilizados. En términos generales, los sistemas de aislación sísmica limitan la energía que el sismo trasfiere a la superestructura, reduciendo considerablemente los esfuerzos y deformaciones de la estructura aislada, previniendo el daño estructural y no estructural. (CDT & CCHC, 2012)

La Figura 2.1 muestra una comparación del comportamiento, ante la acción de un sismo, de un edificio sin aislación y un edificio con aislación sísmica.

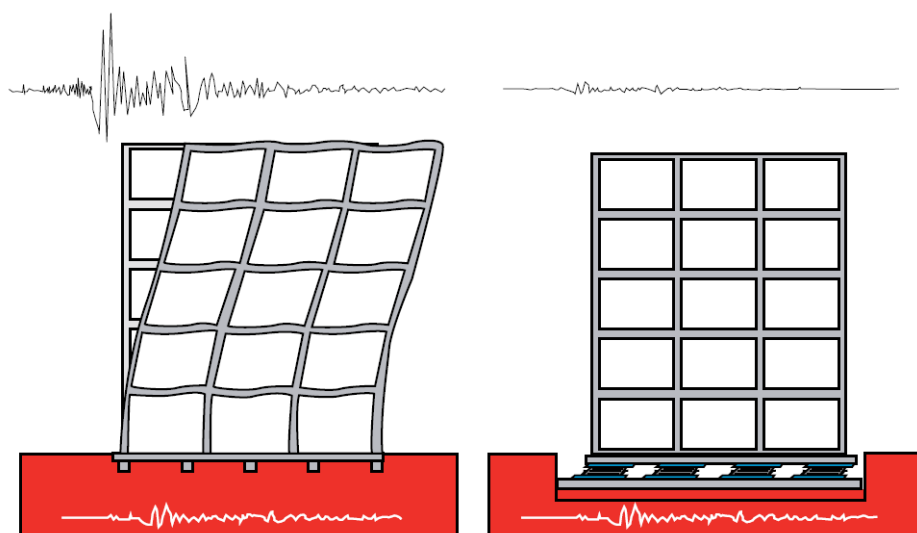


Figura 2.1: Comparación de respuesta sísmica de edificio sin aislación y con aislamiento.

(Adoptada de: (CDT & CCHC, 2012)

Estados Unidos y Japón son los principales precursores del uso de estas tecnologías de protección. Los sistemas de protección sísmica presentaron su mayor auge luego de los terremotos de Northridge (EEUU) en 1994 y Kobe (Japón) en 1995. La Figura 2.2 muestra el aumento del uso de sistemas de aislación sísmica en Japón después del terremoto de Kobe de 1995. En ambos terremotos se observó que las construcciones que poseían sistemas de aislación sísmica se comportaron de excelente forma, lo que estimuló la masificación de este tipo de tecnología.

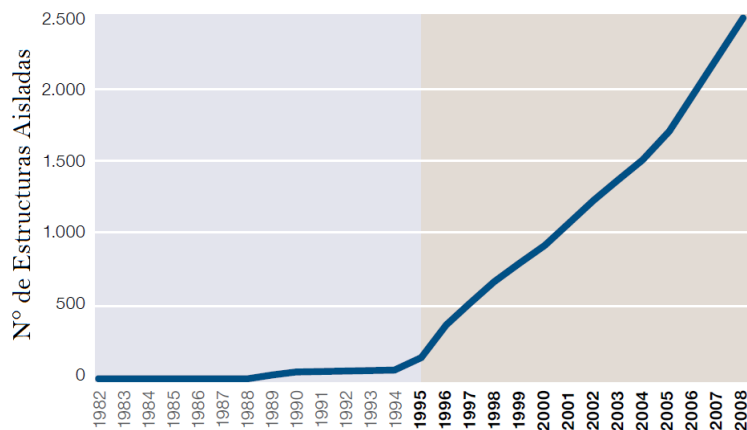


Figura 2.2: Masificación de edificios sísmicamente aislados en Japón.

(Adoptada de: (CDT & CCHC, 2012)

2.3.2 Clasificación de las técnicas de control de respuesta sísmica.

Las técnicas de control de respuesta sísmica se pueden clasificar según la forma como el sistema maneja la energía impuesta por el sismo, su absorción y disipación. Ante diferentes clasificaciones, en la ISO 3010 International Standard “Basis for design of structures- Seismic action on structures” se plantea una clasificación que pretende ser internacional, que consiste en tres sistemas de control de respuesta sísmica: control pasivo, control activo e híbrido y control semiactivo (Cuadro 2.3). (Higashino & Okamoto, 2006)

Cuadros 2.3: Clasificación de las Técnicas de Control de Respuesta Sísmica

Control Pasivo	Aislamiento Sísmico	Mecanismos deslizantes o de rodillos	Apoyo de Rodillos
			Apoyo de placa deslizante, tipo péndulo, basculante
			Capa deslizante
			Otros
	Elemento flexible	Elastómero de multicapas	
		Dispositivo flexible	
		Otros	
	Disipación de energía	De tipo histerético	Acero
			Plomo
			Otros
		De tipo friccionante	
		De tipo Fluido	Hidráulico
	Viscoso		
Otros			
De tipo viscoelástico			
Efecto de Masa Adicional	De masa y resorte		
	De tipo pendular		
	Vibración de líquido		
	Otros		
Otros			
Control Semiactivo	Control de Amortiguamiento	S. de Amortiguamiento Variable	De tipo Hidráulico
		Otro	
	Control de rigidez	Sistemas de rigidez variable	Riostra
Otro			
Otros			
Control Activo e Híbrido	Efecto de masa	Amortiguamiento activo de masa	
		Amortiguamiento híbrido de masa	
	Control de fuerza	Tendón activo	
		Otro	
Otros			

Adoptado de: (Higashino & Okamoto, 2006)

2.3.3 Sistemas de aislamiento sísmico.

El aislamiento sísmico se basa en el principio de desacoplar un edificio (u otra estructura) de efectos dañinos del movimiento del suelo proporcionando flexibilidad adicional y disipación de energía. Los dispositivos se instalan generalmente en el nivel más bajo del edificio, con el fin de que puedan absorber, de forma parcial, la energía impuesta por el sismo antes de que sea transmitida a la superestructura. Los aisladores sísmicos más desarrollados y utilizados en la actualidad son los aisladores elastoméricos de alto amortiguamiento (con o sin núcleo de plomo) y los deslizantes o friccionales. A continuación se detallan brevemente las características generales de los distintos sistemas de aislación sísmica.

En el caso de los aisladores flexibles, la reducción de energía ocurre por el aumento del período de vibración de la estructura, alejándolo del período de vibración natural del suelo y por lo tanto reduce las fuerzas de inercia en la estructura. Por otro lado, los aisladores de fricción reducen la energía por medio del deslizamiento entre el edificio y la cimentación. (Oviedo & Duque, 2006)

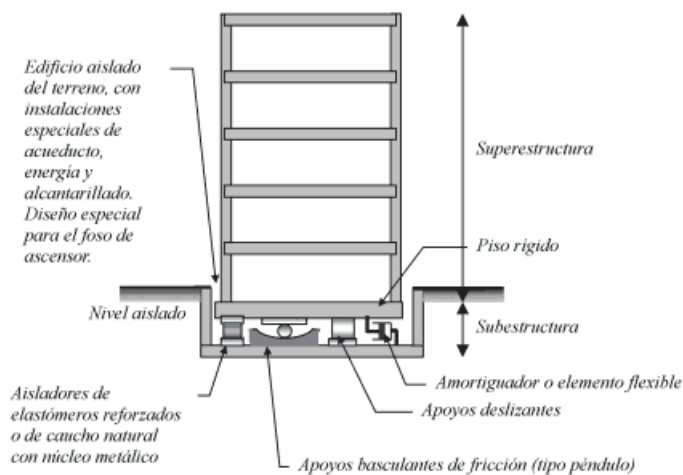


Figura 2.3: Sistema de aislamiento sísmico en la base

(Adoptada de: (Oviedo & Duque, 2006))

2.3.3.1 Aisladores elastoméricos.

Los aisladores elastoméricos están conformados por un conjunto de láminas planas de elastómeros intercaladas con capas de acero. Las láminas de elastómeros son vulcanizadas a las capas de acero con el fin de proveer capacidad para soportar cargas verticales y confinar el núcleo que, por lo general es de plomo, presentan una sección circular o cuadrada. Mediante

esta configuración se logra la flexibilidad lateral necesaria para permitir el desplazamiento horizontal relativo entre la estructura aislada y el suelo. Las principales características que debe cumplir este tipo de aisladores son la alta rigidez vertical, la flexibilidad horizontal, la rigidez torsional, la durabilidad, la resistencia a cambios de temperatura y la resistencia a fuerzas cortantes. Existen varios tipos de apoyos elastoméricos, entre ellos se encuentran: (CDT & CCHC, 2012; Oviedo & Duque, 2006)

- Aisladores elastoméricos de bajo amortiguamiento (LDRB)
- Aisladores elastoméricos con núcleo de plomo (LRB)
- Aisladores elastoméricos de alto amortiguamiento (HDRB)

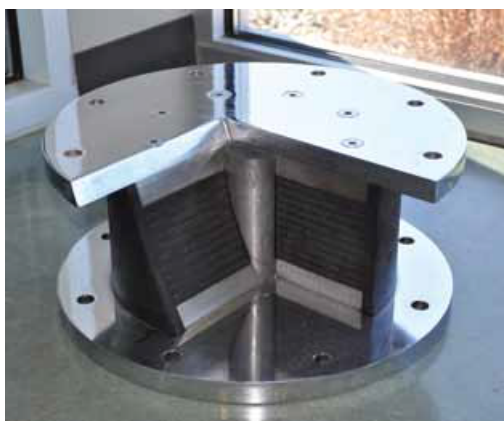


Figura 2.4: Aislador tipo LRB

Adoptada de: (CDT & CCHC, 2012)

2.3.3.2 Aisladores deslizantes.

Entre las primeras contribuciones a los sistemas de aislamiento deslizante está el trabajo sobre el estado estacionario de vibración forzada armónica de un oscilador lineal con amortiguación de fricción Coulomb, una solución exacta a la que se debe a Den Hartog en 1947. (Morgan & Mahin, 2011)

En estos dispositivos la acción de deslizamiento es la base para lograr una baja rigidez horizontal, la disipación de energía se consigue en el interfaz de deslizamiento a través de la amortiguación de Coulomb (o fricción). Entre estos dispositivos de aislamiento tenemos los de apoyos deslizantes y los apoyos basculantes tipo péndulo de fricción (figura 5)

En los apoyos deslizantes las columnas descansan sobre elementos de deslizamiento de teflon⁸ o acero inoxidable y se genera amortiguamiento por fricción, la relación fuerza-desplazamiento es lineal y definido completamente por el radio esférico.. Los apoyos basculantes consisten en una base cóncava sobre la que se colocan un patín esférico articulado y una platina de cubierta. La base cóncava tiene la función de restaurar la posición original del sistema, mientras que las superficies deslizantes, esferas, disipan energía por fricción⁹. El movimiento que se produce en el dispositivo durante la acción de un sismo es similar al movimiento de un péndulo. El coeficiente de fricción del aislador depende de variables tales como la temperatura de trabajo, la presión de contacto, la velocidad de movimiento, el estado de las superficies de contacto (limpieza, rugosidad, etc.) y el envejecimiento. (CDT & CCHC, 2012; Oviedo & Duque, 2006)



Figura 2.5: Aislador de tipo Péndulo Friccional

Adoptada de:(CDT & CCHC, 2012)

2.3.3.3 Tipo de aislador de la presente investigación.

Para la presente investigación se ha optado por contar con un aislador deslizante de triple péndulo friccional, principalmente debido a que en los últimos terremotos ocurridos en Japón, de acuerdo a una investigación realizada por Sociedad Japonesa de Aislamiento Sísmico publicado por la inmobiliaria Japan Property en el 2012, (JPC, 2012), se encontró que el 30 % de los edificios construidos con sistemas de aislamiento de base, sufrieron daños sin llegar a desempeñarse correctamente. El ingeniero Victor Zayas en la conferencia “Soluciones en la ingeniería para minimizar los daños por los sismos” dictada en el colegio

⁸acero revestido de Politetra Fluoro Etileno (PTFE)

⁹permite disipar energía por medio de las fuerzas de rozamiento que se generan durante un sismo

de arquitectos en el 2015, señala que estos edificios que presentaron daños fueron los de tipo elastómericos, por lo que recomienda el uso de los aisladores de tipo péndulo friccional.

2.3.4 Ecuación de movimiento y conceptos de energía.

2.3.4.1 Ecuación diferencial de movimiento en estructuras aisladas.

Se plantea la ecuación diferencial del movimiento de una estructura de un vano y un piso sobre aisladores de base, como se muestra a la izquierda de la figura 2.6. La estructura se modela como un sistema que tiene dos grados de libertad, que son el desplazamiento en la base d_b y el desplazamiento en el primer piso d_1 . Estos se agrupan en el vector D_c definido como:

$$D_c = \begin{bmatrix} d_b \\ d_1 \end{bmatrix}$$

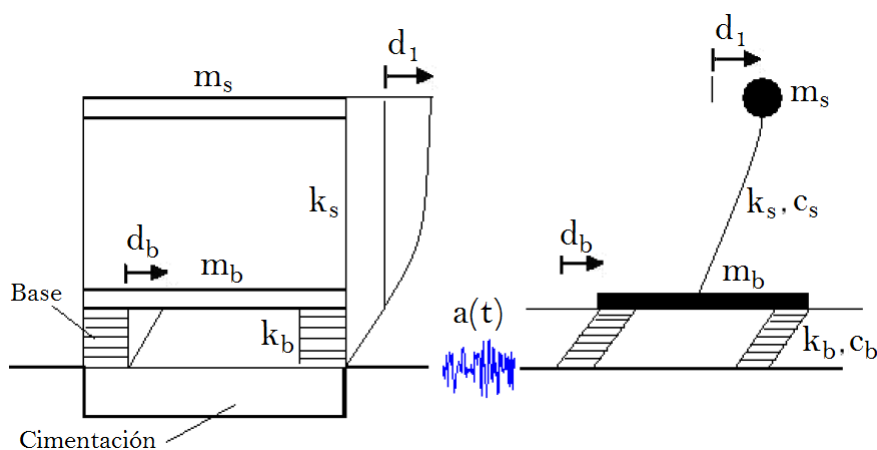


Figura 2.6: Esquema y Modelo Dinámico del sistema considerado

(Adoptada de: (R. Aguiar et al. 2016))

Los grados de libertad definidos, produce que ante el movimiento de la base d_b , el pórtico se mueve como cuerpo rígido y toda la deformación de la superestructura se define con el grado de libertad relativo d_1 , el cual se mide a partir de la estructura desplazada. Para lograr esta condición en el modelo, se unen las dos columnas con una losa si el modelo fuera en tres dimensiones o con una viga para el modelo en dos dimensiones. (R. Aguiar, Luis Almazán, Dechente & Suárez, 2016) El sistema de ecuaciones diferenciales que gobierna el problema dinámico está definido por:

$$M\ddot{D}_C + C\dot{D}_C + KD_C = -MJ_C a(t) \quad (2.1)$$

Donde M , C , K son las matrices de masa, amortiguamiento y rigidez, D_C , \dot{D}_C , \ddot{D}_C son los vectores de desplazamiento, velocidad y aceleración. El vector J_C sirve para definir como incide la dirección de la aceleración basal en el vector de cargas generalizadas; $a(t)$ aceleración del suelo, definido por su acelerograma o por el espectro.

Ecuación de una vibración libre sin amortiguamiento

$$M\ddot{D}_C + KD_C = 0 \quad (2.2)$$

la solución de 2.2 conduce a: $\det |K - \lambda M| = 0$

$$K - \lambda M = \begin{vmatrix} k_b & 0 \\ 0 & k_s \end{vmatrix} - \lambda \begin{vmatrix} m_b + m_s & m_s \\ m_s & m_s \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} k_b - \lambda(m_b + m_s) & -\lambda m_s \\ -\lambda m_s & k_s - \lambda m_s \end{vmatrix}$$

Donde λ es el valor propio, luego se define:

$$\gamma = \frac{m_s}{m_b + m_s} \quad \omega_s = \sqrt{\frac{k_s}{m_s}} \quad \omega_b = \sqrt{\frac{k_b}{m_b + m_s}} \quad \varepsilon = \frac{\omega_b^2}{\omega_s^2}$$

Donde m_s es la masa del sistema de aislamiento (parrilla de vigas y aisladores), m_b es la masa de la superestructura (estructura encima del sistema de aislamiento), ω_s es la frecuencia fundamental de vibración de la superestructura considerando la base empotrada, ω_b es la frecuencia natural del sistema estructural considerado como un cuerpo rígido sobre el sistema de apoyo.

$$\omega_1^2 \approx \omega_b^2 \left(1 - \frac{\gamma \omega_b^2}{\omega_s^2}\right) \approx \omega_b^2 (1 - \gamma \varepsilon) \approx \omega_b^2 \quad (2.3)$$

$$\omega_2^2 \approx \frac{\omega_s^2}{(1 - \gamma)} \left(1 + \frac{\gamma \omega_b^2}{\omega_s^2}\right) \approx \frac{\omega_s^2 (1 + \gamma \varepsilon)}{1 - \gamma \varepsilon} \approx \frac{\omega_s^2}{1 - \gamma} \quad (2.4)$$

ω_1 es función de la frecuencia de vibración del sistema de aislamiento y de la frecuencia de vibración de la superestructura, pero se puede considerar que:

$$\lambda_1 = \omega_1^2 = \omega_b^2 \quad (2.5)$$

Entonces se obtiene: $\left(\frac{2\pi}{T_D}\right)^2 = \frac{k_b}{m_b + m_s}$

de donde:

$$T_D = 2\pi \sqrt{\frac{m_b + m_s}{k_b}} \quad (2.6)$$

La segunda frecuencia resulta mayor a la frecuencia de la superestructura con base empotrada y se incrementa significativamente a medida que la masa de la superestructura es cada vez más grande comparada a la masa del nivel de aislación. Para el cálculo de los modos de vibración se debe reemplazar λ en:

$$(K - \lambda M) \phi = 0$$

Entonces el primer modo y segundo modo resulta respectivamente:

$$\phi^{(1)} = \begin{bmatrix} 1 \\ \varepsilon \end{bmatrix} \quad \phi^{(2)} = \begin{bmatrix} 1 \\ -\frac{1}{\gamma} \end{bmatrix}$$

La figura 2.7, muestra los modos de vibración de un modelo 1 grado de libertad con aisladores en función de los modos o periodos de vibración de un edificio de base fija.

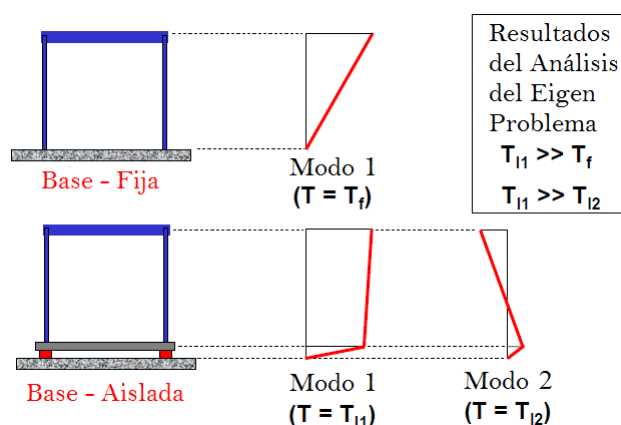


Figura 2.7: Modos de Vibración

(Adoptada de: (FEMA-451B, 2007))

2.3.4.2 Conceptos de energía en estructuras.

Con el fin de estudiar la respuesta de la estructura ante la imposición de cargas se utiliza un modelo matemático basado en la mecánica newtoniana. Toda estructura responde dinámicamente ante la acción de cargas o deformaciones, generando fuerzas inerciales iguales a su masa por la aceleración¹⁰. (Oviedo & Duque, 2006)

Considerando un sistema estructural idealizado en un modelo de un grado de libertad como el mostrado en la figura 2.8, se realiza el análisis dinámico para obtener la respuesta del sistema.

¹⁰segunda ley de Newton, ecuación dinámica de equilibrio

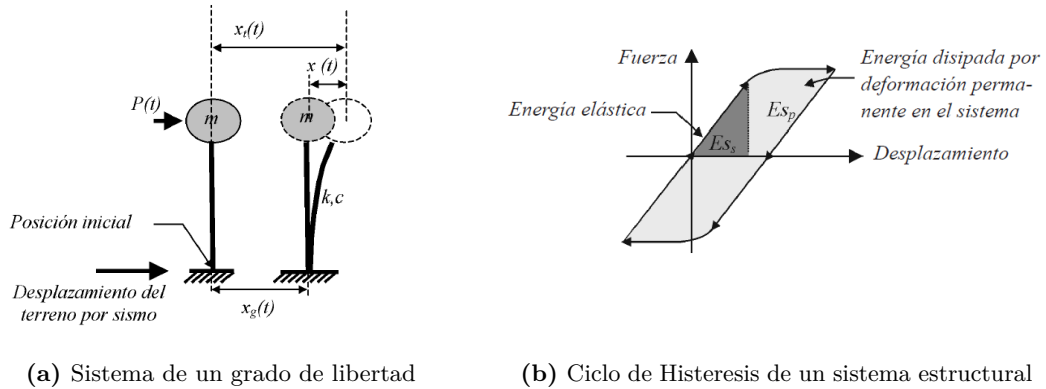


Figura 2.8: Energía en un sistema estructural

Adoptada de: (CDT & CCHC, 2012)

(Housner, 1956), propone utilizar el concepto de energía como herramienta para determinar el comportamiento y la respuesta de una estructura ante cargas dinámicas, citado en (Oviedo & Duque, 2006). Debido a que la ecuación de equilibrio dinámico está planteada en términos de fuerzas, éstas se multiplican por el desplazamiento dx , expresado como $\dot{x}dt$, que es una función de la velocidad, para encontrar el trabajo realizado. Al integrar la ecuación resultante respecto al tiempo de aplicación de la carga (sismo, viento u otras) se obtiene la ecuación de balance de energía desarrollado en el sistema estructural.

La ecuación de balance de energía proviene de la integración de la ecuación de equilibrio de fuerzas y relaciona la fuerza inercial, el amortiguamiento, la fuerza elástica e inelástica del sistema y la fuerza impuesta por el sismo o viento. Adicionalmente, aparece la energía por disipación de energía (E_p) relacionado con la energía en dispositivos de disipación de energía (disipadores y amortiguadores). La ecuación de equilibrio dinámico se escribe como:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = -m\ddot{x}_g + p \quad (2.7)$$

Donde:

$m\ddot{x}$: representa la fuerza inercial de la masa de la edificación.

$c\dot{x}$: es el amortiguamiento inherente del sistema.

kx : es la fuerza elástica del sistema.

Ecuación del balance de energía

$$E_k + E_D + E_S = E_I \quad (2.8)$$

Donde:

$E_k = \int m\dot{x}dx = \frac{m\dot{x}^2}{2}$: es la energía cinética de la masa m ;

$E_D = \int c \dot{x} dx = \int c \dot{x}^2 dt$: es la energía disipada por el amortiguamiento inherente de la estructura;

$E_S = \int k x dx = \frac{kx^2}{2}$: es la energía de deformación elástica del sistema;

E_I es la energía impuesta por las cargas dinámicas de sismo y viento:

$$E_I = E_{I_s} + E_{I_w}$$

$E_{I_s} = - \int m \ddot{x}_g dx$, energía impuesta por el sismo.

$E_{I_w} = \int P(t) dx$, energía impuesta por el viento.

$$E_S = \int f_s(x) dx = E_{S_s} + E_{S_p}$$

En el caso de que el sistema alcance a responder en el rango inelástico de los materiales, en el término E_S se debe incluir y distinguir la participación de la estructura dentro del rango elástico y el inelástico. Donde E_{S_p} es la energía disipada por efectos histéreticos de deformación plástica y daño de los elementos estructurales, y el término E_{S_s} es la energía de deformación elástica no disipada.

Cuando se hace uso de dispositivos especiales disipadores o amortiguadores de energía se introduce el término E_p en la ecuación 2.8. (Oviedo & Duque, 2006) La ecuación del balance de energía viene dada finalmente por 2.9

$$\mathbf{E}_k + \mathbf{E}_D + \mathbf{E}_{S_s} + \mathbf{E}_{S_p} + \mathbf{E}_p = \mathbf{E}_I \quad (2.9)$$

Debido al balance de energía, en la medida en que se aumente el término \mathbf{E}_p , la disipación de energía por histéresis \mathbf{E}_{S_p} de la estructura disminuye y la participación de los componentes estructurales es menor, el nivel de daño en la estructura se reduce y se concentra en los dispositivos adicionales, que son elementos totalmente identificados y fáciles de reemplazar.

2.3.5 Sistema de aislamiento de tipo péndulo de fricción.

Esta sección proporciona una descripción de configuración y principios de operación de los aisladores deslizantes multiesféricos. En muchos casos, son simplemente una ampliación lógica del comportamiento del aislador de Péndulo de Fricción, Aunque el comportamiento de fuerza-desplazamiento de estos dispositivos pueden ser complejos, en última instancia se sigue de la aplicación de estos conceptos fundamentales.

Conocemos tres tipos fundamentales de aisladores de Péndulo de Fricción, son, los péndulos simples o también llamados aisladores FPS de primera generación, péndulos dobles también llamados aisladores FPS de segunda generación y los péndulos triples también llamados aisladores FPS de tercera generación.

Esencialmente, la construcción de estos dispositivos consiste en varias disposiciones de elementos cóncavos, placas y deslizadores internos. El concepto no es nuevo, de hecho, el primer aislamiento documentado fue en estados unidos en 1870 (Touaillon, 1870), cuyo sistema para edificios era un rodamiento de bolas doble y cóncavo. Este sistema fue inventado por Jules Touaillon y se muestra en la figura 2-1. (Fenz & Constantinou, 2008b)

Los primeros estudios de edificios de varios pisos aislados con sistemas que incorporan elementos de deslizamiento son informados por Kelly y Beucke en 1983¹¹. (Morgan & Mahin, 2011) Con el objetivo de verificar la idoneidad del aislador de péndulo de fricción para diferentes aplicaciones prácticas, una extensa serie de programas de prueba se han llevado a cabo desde 1986. Se han realizado pruebas en el Centro de Investigación de Ingeniería de Terremotos (EERC), Universidad de California en Berkeley y el Centro Nacional de Investigación en Ingeniería de Terremotos (NCEER), Universidad Estatal de Nueva York en Buffalo. (V.A. Zayas et al. 1994)

Los primeros estudios analíticos y experimentales sobre aislamiento de péndulo de fricción (FP), fue conducido por (Victor Zayas et al. 1987). Este programa de investigación identificó el potencial para lograr un aislamiento de base confiable mediante la introducción de una superficie de deslizamiento esféricas simulando así el comportamiento del péndulo. A partir del cual diferentes autores han venido desarrollando estudios diversos sobre este sistema de aislación. (Morgan & Mahin, 2011)

Recientemente, se han introducido y aplicado aisladores de péndulo de fricción de varias etapas en proyectos en todo el mundo. Tsai et al. en 2008¹² propuso un sistema de péndulo de fricción múltiple (MFPS) que consiste en múltiples interfaces deslizantes y un deslizador articulado. Tales aisladores exhiben gran capacidad de desplazamiento en relación con los aisladores que consiste en una sola superficie esférica.

Fenz y Constantinou en el 2006¹³ presentaron un trabajo adicional sobre los rodamientos de péndulo de fricción (FP) con dos superficies esféricas y distintos coeficientes de fricción en cada interfaz deslizante, conduciendo a un comportamiento deslizante que exhibe respuesta histerética en múltiples etapas. (Morgan & Mahin, 2011)

¹¹en el artículo "A friction damped base isolation system with fail-safe characteristics," Earthquake Engineering and Structural Dynamics

¹²en el artículo: "Finite element formulations and shaking table tests of direction-optimized friction pendulum system," *Engineering Structures*

¹³en el artículo: "Behaviour of the double concave Friction Pendulum bearing," en *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*

El comportamiento analítico de los aisladores de triple péndulo de Fricción (TFP), incluidos los modelos cíclicos adecuados con verificación experimental, ha sido publicada por (Fenz & Constantinou, 2008b, 2008a) y Becker y Mahin en 2010¹⁴. Estos tipos de cojinetes se describen con más detalle en el siguiente capítulo.

2.3.6 Modelos de fuerzas-desplazamiento de aisladores.

El análisis de edificios aislados sísmicamente requiere un modelo matemático del comportamiento lateral Fuerza-Desplazamiento del aislador. El verdadero comportamiento de un aislador es no lineal y complejo, por lo tanto existen diferentes modelos de análisis con diferente sofisticación. Se utiliza para caracterizar el comportamiento de fuerza-desplazamiento de aisladores elastoméricos y deslizantes; específicamente, qué propiedades o parámetros gobiernan el comportamiento de fuerza-desplazamiento. (McVitty & Constantinou, 2015)

Los aisladores deslizantes son los tipos predominantes de aisladores sísmicos utilizados en la práctica. Las características deseables de estos aisladores es que lateralmente tienen una baja rigidez, con buena disipación de energía y capacidad de recentrado. Verticalmente se mantienen estables bajo el peso del edificio y grandes desplazamientos, el comportamiento de fuerza-desplazamiento es no lineal, histerético y puede idealizarse mediante una línea bilineal rígida-lineal o modelo trilineal. Estos tipos de aisladores han sido ampliamente probados e implementados en la práctica durante los últimos 30 años, con un diseño basado en los modelos que siguen. (McVitty & Constantinou, 2015)

2.3.6.1 Modelado de unidades aisladoras deslizantes.

Los aisladores deslizantes de forma esférica vienen en una variedad de configuraciones, con el comportamiento dictado por diferentes combinaciones de superficies sobre las que se produce el deslizamiento. La formulación, implementación y validación de modelos para aisladores deslizantes multiesféricos se puede encontrar en (Fenz & Constantinou, 2008b). Las configuraciones de doble y triple Péndulo de Fricción ofrecen muchos beneficios sobre la configuración de péndulo único. Por ejemplo, aisladores más compactos, mayor capacidad de desplazamiento, menor deslizamiento, velocidades (aproximadamente a la mitad) y, por lo tanto, reduce el calentamiento por fricción y los problemas asociados con desgaste y

¹⁴en el artículo: “Three Dimensional Modeling of Triple Friction Pendulum Isolators”

variabilidad en la fricción. Este informe se centra en un tipo “especial” de Triple Péndulo de Fricción, que se utiliza comúnmente en la práctica. (McVitty & Constantinou, 2015)

El modelo rígido-lineal (Figura 2.9), es un modelo simple pero valioso que se puede usar para todos los aisladores de tipo Péndulo Friccionales. Los dos parámetros que gobiernan el rendimiento son la resistencia característica en el desplazamiento cero, Q_d y la rigidez post-elástica K_d . Q_d es una función del coeficiente de fricción μ y el peso W , mientras que k_d es una función del radio efectivo de curvatura de las placas cóncavas R_{eff} y el peso W . Es una representación precisa para un solo aislador de Péndulo de Fricción y para un aislador doble Péndulo de Fricción, donde la parte superior y las placas cóncavas inferiores tienen el mismo radio de curvatura y el mismo coeficiente de fricción. Para un triple péndulo friccional el aislador predice ligeramente el coeficiente de fricción en el desplazamiento cero. k_d es igual a $W/2R_{eff1}$ para aisladores FPS dobles y triples cuando las superficies cóncavas superior e inferior tienen un radio de curvatura idéntico. (McVitty & Constantinou, 2015)

Para este modelo, solo se debe determinar la resistencia de la prueba, ya que la rigidez se calcula a partir de la teoría. El coeficiente de fricción en el desplazamiento cero, μ , se determina directamente a partir de la energía medida disipada por ciclo (normalizado por el peso) dividido por la distancia recorrida.

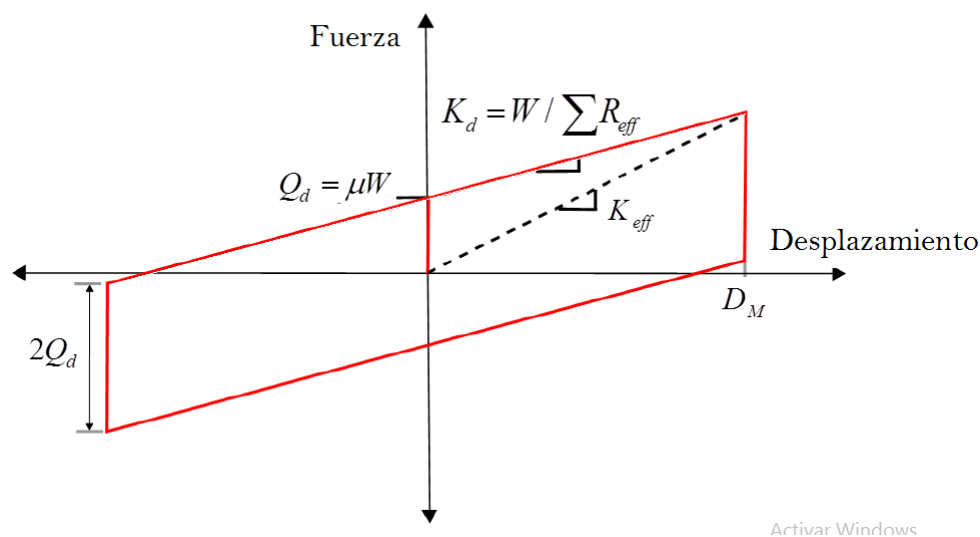


Figura 2.9: Comportamiento Fuerza-Desplazamiento rígido-lineal de aisladores FP

Adoptada de: (Fenz & Constantinou, 2008b)

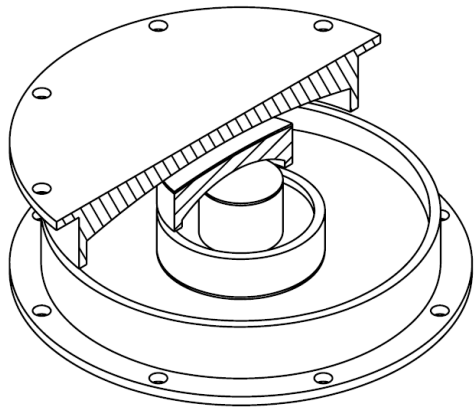
2.3.7 Aisladores de triple péndulo de fricción.

El Aislador de Triple péndulo de fricción al que apartir de ahora denominamos aislador FPT por sus siglas en ingles (Triple Friction Pendulum), permite a los ingenieros elegir diferentes combinaciones de rigidez y amortiguación en diferentes niveles de excitación y alcanzar múltiples objetivos de rendimiento que no eran accesibles en el pasado. Encontrar la combinación óptima de sus parámetros de diseño (radios de curvatura, los coeficientes de fricción y las capacidades de desplazamiento) es un proceso complicado y sus valores óptimos dependen del movimiento de entrada característico y sísmica objetivo de desempeño de la superestructura. (Moeindarbari & Taghikhany, 2012)

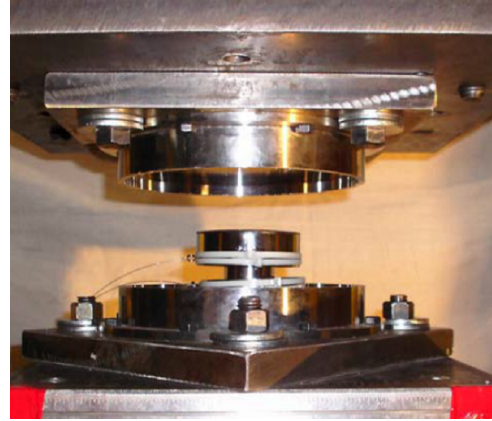
Al tener comportamiento no lineal y complejo a medida que el desplazamiento aumenta, hay múltiples cambios en la rigidez. Típicamente a bajos niveles de fuerza/desplazamiento el sistema es muy rígido, en comparación a un sismo de diseño (DBE) en el que hay una menor rigidez y un aumento de la amortiguación, y el comportamiento también difiere a un sismo máximo considerado (MCE) donde hay una mayor rigidez para controlar los desplazamientos. Esto da lugar a un sistema adaptativo que puede ser optimizado para diferentes niveles de rendimiento. (F. R. Aguiar & Leyva, 2017; McVitty & Constantinou, 2015)

El comportamiento de los aisladores TFP se denomina como adaptativa debido a que exhiben progresivamente diferentes propiedades de histéresis en las diferentes etapas del desplazamiento. La rigidez y la amortiguación se pueden cambiar a los valores predecibles en diferentes amplitudes controlables. Estas propiedades permiten el diseño del sistema de aislamiento para ser optimizado por separado en múltiples niveles de excitación de entrada. (Fenz & Constantinou, 2008b)

La construcción interna de estos rodamientos permite el deslizamiento en diferentes combinaciones de superficies durante el curso de su movimiento, lo que resulta en cambios de rigidez y amortiguación. En la figura 2.11 se muestra las superficies que conforman el aislador FPT.



(a) Vista en corte del Aislador Triple FPT



(b) Fotografía de una muestra del aislador FPT

Figura 2.10: Aislador Triple Péndulo Friccional

Adoptada de: (Fenz & Constantinou, 2008b)

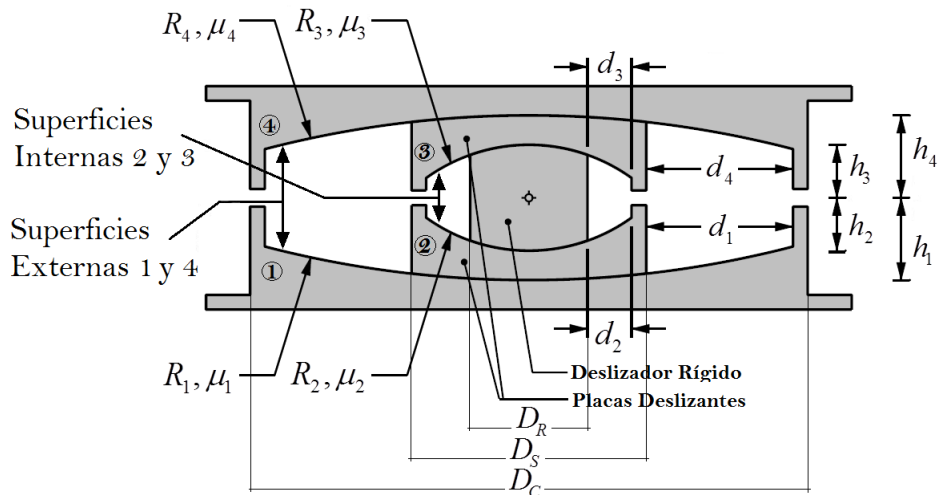


Figura 2.11: Sección transversal del aislador FPT

Adoptada de: (Fenz & Constantinou, 2008b)

Donde:

R_i : es el radio de curvatura de la superficie i

h_i : Distancia radial entre el punto pivote y la superficie i

d_i : Capacidad de desplazamiento presentado en la figura 2.11

μ_i : Coeficiente de fricción de la superficie de deslizamiento i

i : Varía de 1 a 4 por la existencia de 4 superficies

Refiriéndose a la nomenclatura establecida en la figura 2.11, el aislador de triple péndulo friccional totalmente adaptable está configurado de la siguiente manera:

- a) Se considera $R_{eff1} = R_{eff4} \gg R_{eff2} = R_{eff3}$, esta condición, cuando se combina con la especificación adecuada de fricción los coeficientes resultarán en las transiciones deseables de rigidez en todo el curso de movimiento, Donde el radio efectivo de la superficie i esta dada por $R_{effi} = R_i - h_i$.
- b) Los coeficientes de fricción se seleccionan de modo que el aislador muestre una alta rigidez y baja fricción inicialmente y posteriormente disminuye en rigidez y Aumenta la fricción efectiva a medida que aumenta la amplitud del desplazamiento. Esta se logra utilizando materiales de fricción que dan, $\mu_2 = \mu_3 < \mu_1 < \mu_4$.
- c) Las capacidades de desplazamiento de cada superficie se seleccionan para que haya Rigidez gradual a grandes desplazamientos. El deslizador debe contactar al tope de desplazamiento en las superficies 1 y 4 antes de las superficies 2 y 3. Siempre el movimiento se inicia en las superficies 2 y 3 antes de las superficies 1 y 4, esto es garantizado siempre y cuando $F_{f1} < F_{dr2}$ y $F_{f4} < F_{dr3}$. En términos de desplazamientos, esta condición es $d_2 > (u_1 - u_2) R_{eff2}$ y $d_3 > (u_4 - u_3) R_{eff3}$.
- d) El deslizamiento debe iniciarse en la superficie de mayor fricción antes del inicio de cualquier endurecimiento, es decir $F_{f4} < F_{dr1}$. En términos de desplazamientos, esta condición se satisface mediante $d_1 > (u_4 - u_3) R_{eff1}$. Esto es para evitar alguna situación en la que el aislador sufra un ciclo repetido de rigidización-flexibilización, lo que ocurriría si $F_{dr1} < F_{f4}$.

2.3.8 Modelo de las 5 fases para el aislador FPT.

De acuerdo a la configuración presentada la sección 2.3.7, para cualquier instante del movimiento, el deslizamiento ocurre simultáneamente en dos superficies, de esta manera el movimiento queda definido en cinco fases de deslizamiento, cada una correspondiente a las distintas combinaciones de superficie en las cuales ocurre el deslizamiento. (*Tipanluisa, 2017*) Presentamos de manera resumida el análisis del diagrama de cuerpo libre en la fase I, las fases siguientes se realizaran de manera similar, para más detalles se recomienda revisar (*Fenz & Constantinou, 2008b*)

2.3.8.1 Fase de Deslizamiento I.

El régimen de deslizamiento I consiste en deslizar en las superficies 2 y 3 y no deslizar en las superficies 1 y 4. Los principios básicos de operación descritos anteriormente dictan que a partir del reposo, el movimiento se iniciará cuando la fuerza horizontal exceda la fuerza de fricción en la(s) superficie(s) de menor fricción. Por lo tanto, el deslizamiento comienza en las superficies 2 y 3 cuando $F = F_{f2} = F_{f3}$. La forma desplazada y diagramas de cuerpo libre de los componentes del aislador durante este régimen se muestran en las figuras 2.12 y 2.13.

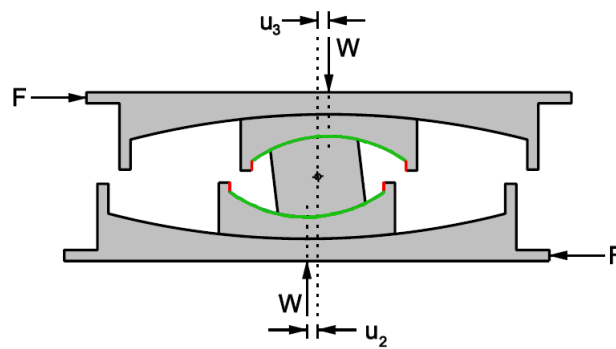


Figura 2.12: Régimen del movimiento durante la fase I

Adoptada de: (Fenz & Constantinou, 2008b)

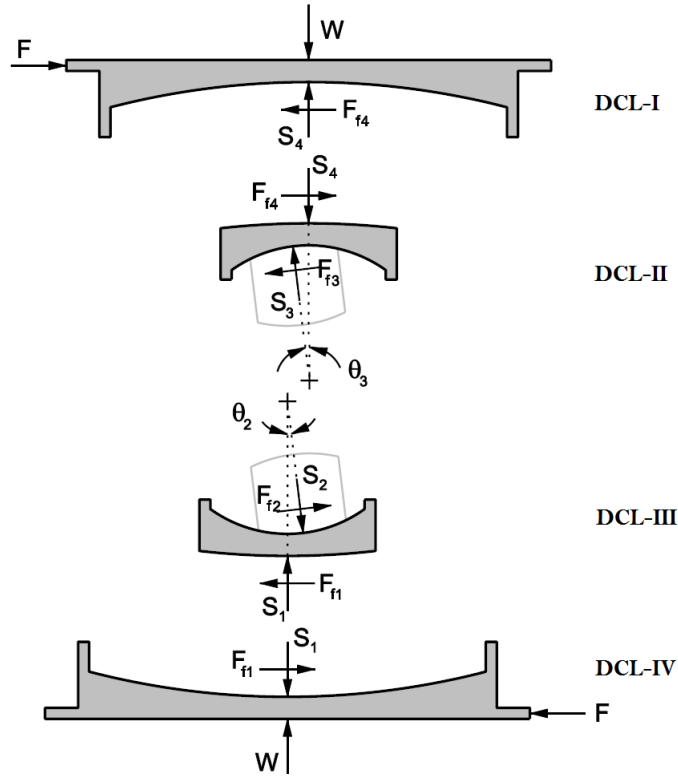


Figura 2.13: Diagrama de Cuerpo libre Fase I

Adoptada de: (Fenz & Constantinou, 2008b)

De la figura 2.13, considerando el equilibrio en las direcciones horizontal y vertical del DCL-I, obtenemos las siguientes relaciones:

$$S_1 + F_{f2} \sin \theta_2 - S_2 \cos \theta_2 = 0 \quad (2.10)$$

$$F_{f2} \cos \theta_2 + S_2 \sin \theta_2 - F_{f1} = 0 \quad (2.11)$$

También del DCL-IV, obtenemos:

$$F = F_{f1} \quad (2.12)$$

$$W = S_1 \quad (2.13)$$

De la geometría, el desplazamiento relativo del control deslizante en la superficie 2, u_2 , es

$$u_2 = R_{eff2} \sin \theta_2 \quad (2.14)$$

Combinando las ecuaciones 2.10 al 2.14 y suponiendo que el desplazamiento relativo u_2 es suficientemente pequeño en comparación con el radio efectivo R_{eff2} para que $\cos \theta_2 = 1$:

$$F = \frac{W}{R_{eff2}} u_2 + F_{f2} \quad (2.15)$$

Las ecuaciones 2.10 al 2.14 son las ecuaciones de equilibrio para el modelo convencional del aislador de péndulo de fricción (Victor Zayas et al. 1987). Realizando un análisis de equilibrio similar en DCL-I Y DCL-II en la superficie 3, tenemos:

$$F = \frac{W}{R_{eff3}} u_3 + F_{f3} \quad (2.16)$$

La relación fuerza-desplazamiento total para el aislador durante la Fase deslizante I es determinado mediante la combinación de las ecuaciones 2.15 y 2.16 en función del hecho de que el desplazamiento total u es la suma de los desplazamientos u_2 y u_3 , como $u_1 = u_4 = 0$, lo que resulta en:

$$F = \frac{W}{R_{eff2} + R_{eff3}} u + \frac{F_{f2} R_{eff2} + F_{f3} R_{eff3}}{R_{eff2} + R_{eff3}} \quad (2.17)$$

Al revertir el movimiento, el aislador se descarga por $2F_{f2}$ ($= 2F_{f3}$) y el deslizamiento se inicia nuevamente en las superficies 2 y 3. Como se muestra en la figura 2.14, el comportamiento histerético es rígido-lineal con rigidez post-elástica igual a la suma de los radios efectivos de las superficies 2 y 3, con una resistencia igual al coeficiente de fricción promedio en estas dos superficies. Esta etapa forma un mecanismo de péndulo y define las propiedades del sistema de aislamiento en niveles bajos de excitación (Sismos menores o de nivel de servicio).

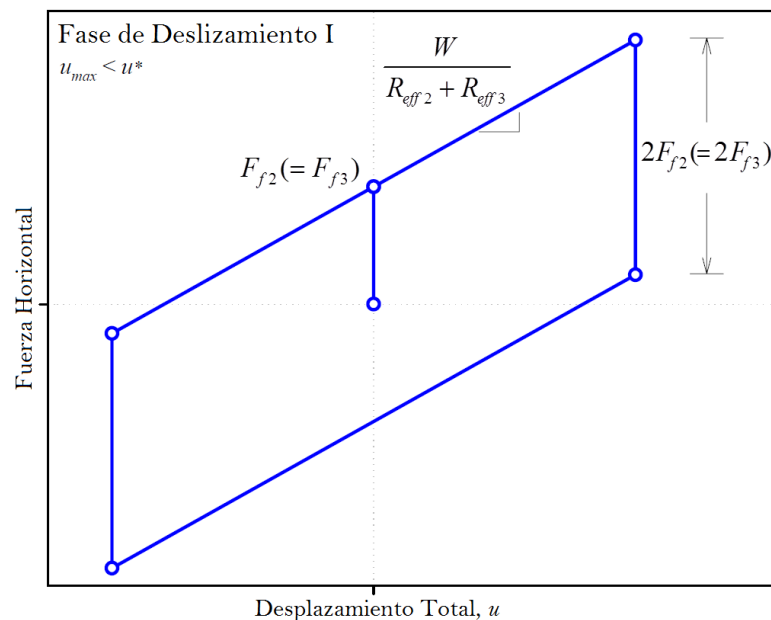


Figura 2.14: Relación fuerza-desplazamiento durante la Fase I

Adoptada de: (Fenz & Constantinou, 2008b)

2.3.8.2 Fase de deslizamiento II

Cuando $F = F_{f1}$, el movimiento comienza en la superficie 1, marcando el inicio de la fase de deslizamiento II. La transición se produce en el desplazamiento u^* dado por:

$$u^* = (\mu_1 - \mu_2) R_{eff2} + (\mu_1 - \mu_3) R_{eff3} \quad (2.18)$$

La ecuación 2.18 se obtiene al resolver la ecuación 2.17 para el desplazamiento cuando $F = F_{f1}$. La figura 2.15 muestra los diagramas de la forma desplazada.

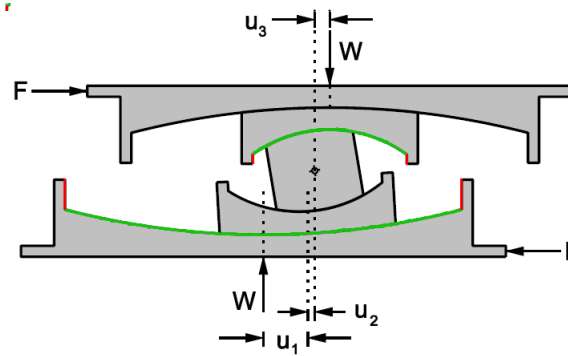


Figura 2.15: Régimen del movimiento durante la fase II

Adoptada de: (Fenz & Constantinou, 2008b)

El deslizamiento en esta fase ocurre solo en las superficies 1 y 3, la relación fuerza-desplazamiento total para la fase de deslizamiento II está determinada por la ecuación 2.19:

$$F = \frac{W}{R_{eff1} + R_{eff3}} u + \frac{F_{f1} (R_{eff1} - R_{eff2}) + F_{f2} R_{eff2} + F_{f3} R_{eff3}}{R_{eff1} + R_{eff3}} \quad (2.19)$$

Esta relación se muestra en la figura 2.16. Tras la inversión del movimiento, el aislador se descarga por $2F_{f2} (= 2F_{f3})$ y el movimiento se reanuda en las superficies 2 y 3. El movimiento continúa en las superficies 2 y 3 para una distancia de $2u^*$ hasta que se produce la descarga por $2F_{f1}$, en cuyo punto el deslizamiento se reinicia en la superficie 1 y se detiene en la superficie 2. El deslizamiento continúa luego en las superficies 1 y 3. En comparación con la fase de deslizamiento I, la transición a la fase de deslizamiento II se acompaña de una reducción de la rigidez y aumento de la fricción efectiva. Este mecanismo define las propiedades primarias del sistema de aislamiento en niveles moderados de excitación (Sismo de Diseño DBE).

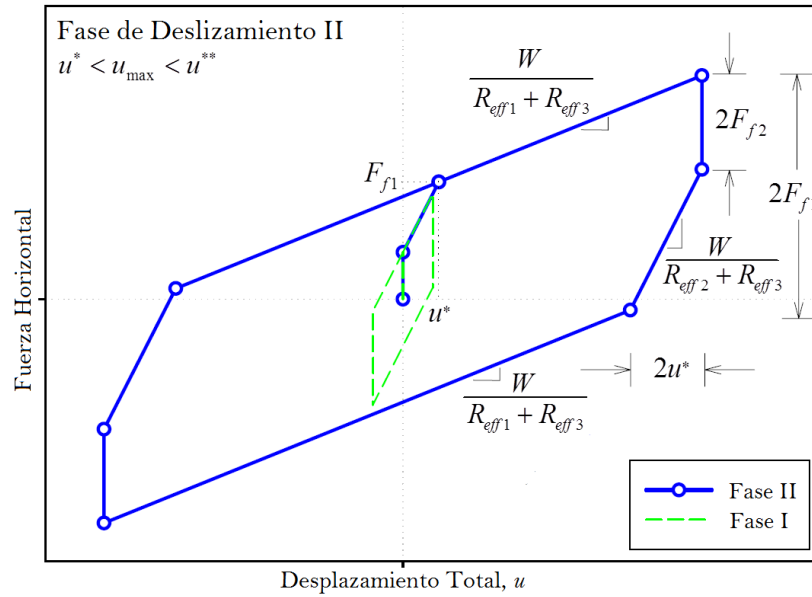


Figura 2.16: Relación fuerza-desplazamiento durante la Fase II

Adoptada de: (Fenz & Constantinou, 2008b)

2.3.8.3 Fase de deslizamiento III.

El deslizamiento se inicia en la superficie 4 cuando $F = F_{f4}$, que ocurre en el desplazamiento u^{**} dado por:

$$u^{**} = u^* + (\mu_4 - \mu_1) (R_{eff1} + R_{eff3}) \quad (2.20)$$

La ecuación 2.20 se obtiene al resolver la ecuación 2.19 para el desplazamiento cuando $F = F_{f4}$. La figura 2.17 muestra los diagramas de la forma desplazada.

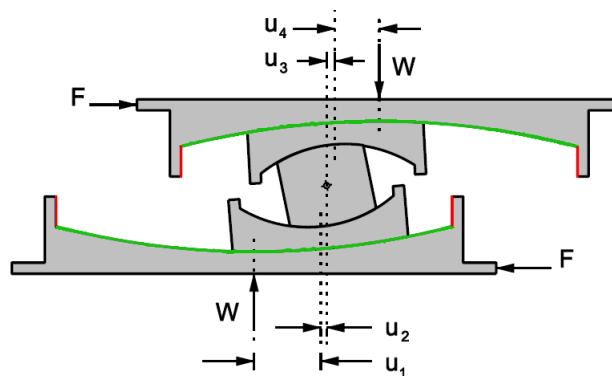


Figura 2.17: Régimen del movimiento durante la fase III

Adoptada de: (Fenz & Constantinou, 2008b)

Tan pronto como comienza el deslizamiento en la superficie 4, se detiene en superficie 3, la relación fuerza-desplazamiento total para la fase de deslizamiento III está determinada por la ecuación 2.21:

$$F = \frac{W}{R_{eff1} + R_{eff4}} u + \frac{F_{f1}(R_{eff1} - R_{eff2}) + F_{f2}R_{eff2} + F_{f3}R_{eff3} + F_{f4}(R_{eff4} - R_{eff3})}{R_{eff1} + R_{eff4}} \quad (2.21)$$

Esta relación fuerza-desplazamiento se muestra en la figura 2.18. En comparación con las fases I y II, la transición a la fase deslizante III se acompaña de una reducción de la rigidez y un aumento de la fricción efectiva. Cuando el movimiento se invierte, se produce la descarga en $2F_{f2}(= 2F_{f3})$ y se reanuda el deslizamiento en las superficies 2 y 3. El movimiento continúa en las superficies 2 y 3 para una distancia de $2u^*b$ hasta que el aislador se haya descargado por $2F_{f1}$, momento en el que el deslizamiento comienza en la superficie 1 y se detiene en la superficie 2. Desde este punto, el movimiento continúa en las superficies 1 y 3 para una distancia de $2u^{**} - 2u^*$ hasta que el aislador se haya descargado por $2F_{f4}$. En este punto, el movimiento se reanuda en la superficie 4, se detiene en la superficie 3 y se produce el deslizamiento en las superficies 1 y 4. El coeficiente de fricción de la superficie cóncava superior 4 es suficientemente grande para evitar el deslizamiento hasta que se produce un nivel extremo de excitación (terremoto máximo considerado MCER).

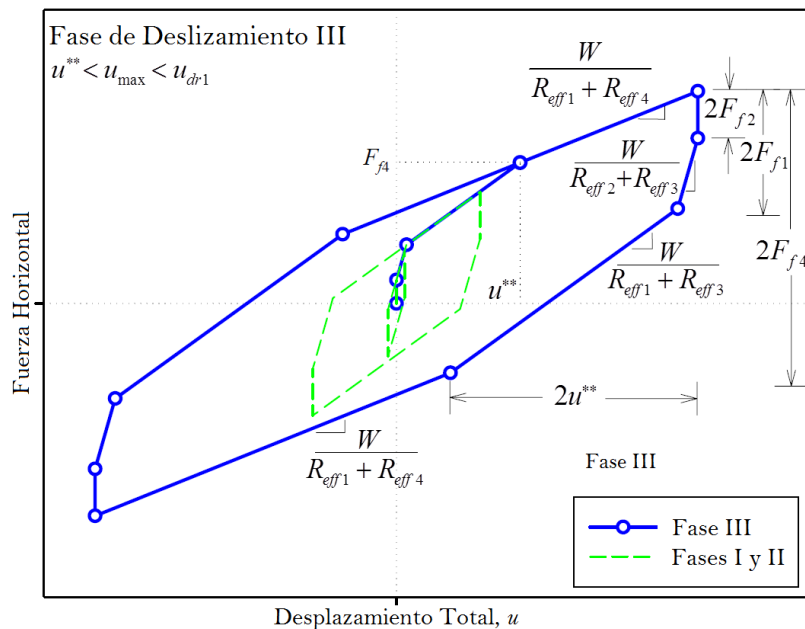


Figura 2.18: Relación fuerza-desplazamiento durante la Fase III

Adoptada de: (Fenz & Constantinou, 2008b)

2.3.8.4 Fase de deslizamiento IV.

La rigidización del aislador de Triple Péndulo en grandes desplazamientos, se logra deteniendo el movimiento en superficies con un radio efectivo grande y forzarlo a ocurrir en superficies con menor radio efectivo.

La fase de deslizamiento IV comienza cuando el movimiento cambia, de deslizarse en la superficie 1 y 4 para deslizarse en las superficies 2 y 4, esto ocurre cuando se alcanza el “tope” de desplazamiento en la superficie 1. En este punto, el desplazamiento en la superficie 1 es $u_1 = d'_1$ y la fuerza horizontal, F_{dr1} , es:

$$F_{dr1} = \frac{W}{R_{eff1}} d_1 + F_{f1} \quad (2.22)$$

La transición entre las fases de deslizamiento III Y IV ocurre en un desplazamiento total de u_{dr1} , dado por:

$$u_{dr1} = u^{**} + d_1 \left(1 + \frac{R_{eff4}}{R_{eff1}} \right) - (\mu_4 - \mu_1) (R_{eff1} + R_{eff4}) \quad (2.23)$$

La ecuación 2.23 se obtiene al resolver la ecuación 2.20 para u con $F = F_{dr1}$. El diagrama de la forma desplazada para la fase de desplazamiento IV se muestra en la figura 2.23 El “tope” que entra en contacto con el deslizador en la superficie 1 introduce una fuerza adicional F_{r1} en el deslizador. Se asume que el “tope” de desplazamiento es rígido, la relación de fuerza-desplazamiento que gobierna el movimiento en la superficie 1 es:

$$F = \frac{W}{R_{eff1}} d_1 + F_{f1} + F_{r1} \quad (2.24)$$

El diagrama de la forma desplazada para la fase de desplazamiento IV se muestra en la figura 2.19.

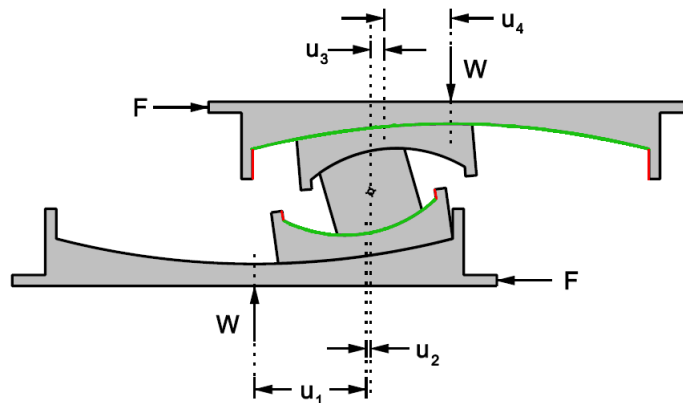


Figura 2.19: Régimen del movimiento durante la fase IV

Adoptada de: (Fenz & Constantinou, 2008b)

El deslizamiento en esta fase se produce en las superficies 2 y 4, la relación fuerza-desplazamiento total para la fase de deslizamiento IV está definida por la ecuación 2.25:

$$F = \frac{W}{R_{eff2} + R_{eff4}} (u - u_{dr1}) + \frac{W}{R_{eff1}} d_1 + F_{f1} \quad (2.25)$$

Esta relación se muestra en la figura 2.20. Tras la inversión del movimiento, el aislador se descarga por $2F_{f2}(= 2F_{f3})$ y el movimiento se reanuda en las superficies 2 y 3. Luego que el deslizador entra en contacto con el “tope” que limita el desplazamiento en la superficie 1, el movimiento no se iniciará en esta superficie hasta que el rodamiento se haya descargado por $F_{r1} + 2F_{f1}$ hasta:

$$F = \frac{W}{R_{eff1}} d_1 - F_{f1} \quad (2.26)$$

El deslizamiento se reanuda en la superficie 4 cuando el rodamiento se ha descargado por $2F_{f4}$. El orden en que se reanudan los deslizamientos se determinan comparando las cantidades $F_{r1} + 2F_{f1}$ y $2F_{f4}$. Puede ser demostrado que para la fase de deslizamiento IV, la magnitud del desplazamiento máximo total, $u_{m\acute{a}x}$, satisface lo siguiente:

$$u_{m\acute{a}x} > u_{dr1} + 2(\mu_4 - \mu_1)(R_{eff2} + R_{eff4}) \quad (2.27)$$

Para un configuración estandar del aislador FPT, donde $d_1 = d_4$ y $R_{eff1} = R_{eff4}$, la ecuación 2.27 no se cumple antes del inicio de la fase V, entonces el movimiento se reanuda en la superficie 1 antes que en la 4 ($F_{r1} + 2F_{f1} < 2F_{f4}$).

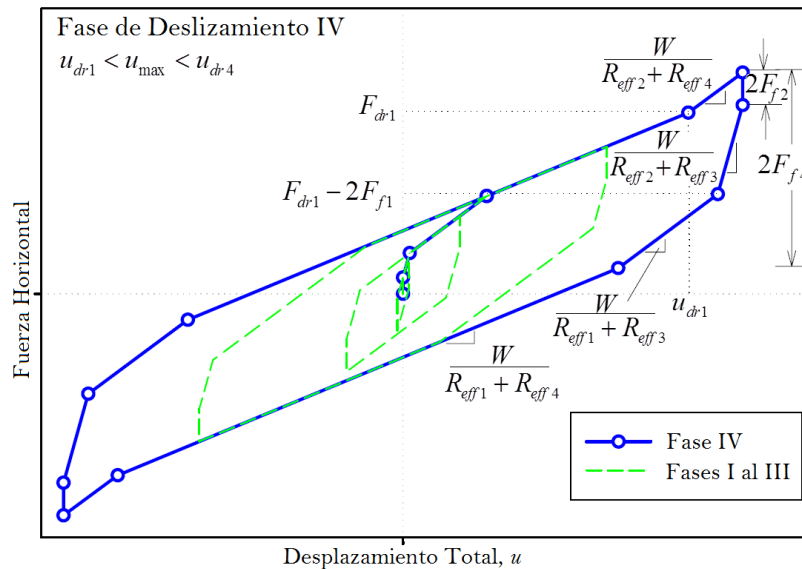


Figura 2.20: Relación fuerza-desplazamiento durante la Fase IV

Adoptada de: (Fenz & Constantinou, 2008b)

2.3.8.5 Fase de deslizamiento V.

La fase de deslizamiento V comienza cuando el movimiento cambia de deslizamiento de la superficie 2 y 4 al deslizamiento en las superficies 2 y 3, lo que ocurre cuando se hace contacto con tope que limita el desplazamiento en la superficie 4. La forma desplazada del aislador para esta fase se muestra en la figura 2.21.

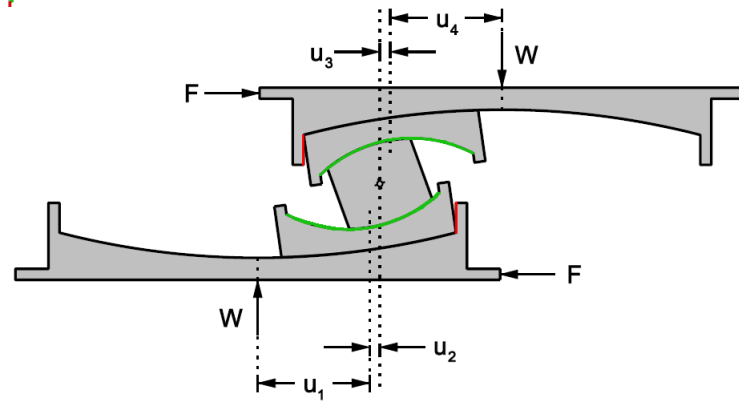


Figura 2.21: Régimen del movimiento durante la fase V

Adoptada de: (Fenz & Constantinou, 2008b)

En el punto de transición, el desplazamiento en la superficie 4 es $u_4 = d_4$ y la fuerza horizontal, F_{dr4} , es:

$$F_{dr4} = \frac{W}{R_{eff4}} d_4 + F_{f4} \quad (2.28)$$

La transición entre las fases de deslizamiento se produce con un desplazamiento total de u_{dr4} , dada por

$$u_{dr4} = u_{dr1} + \left[\left(\frac{d_4}{R_{eff4}} + \mu_4 \right) - \left(\frac{d_1}{R_{eff1}} + \mu_1 \right) \right] (R_{eff2} + R_{eff4}) \quad (2.29)$$

El efecto del contacto con el tope que limita el deslizamiento en la superficie 4, se traduce en una fuerza adicional F_{f4} . Asumiendo que el tope es rígido, la relación fuerza-desplazamiento que gobierna el movimiento en la superficie 4 está dada por:

$$F = \frac{W}{R_{eff4}} d_4 + F_{f4} + F_{r4} \quad (2.30)$$

El deslizamiento se reanuda en la superficie 3, se realiza el contacto con el tope que limita el deslizamiento en la superficie 4. Nada ha cambiado en la parte inferior del rodamiento, el movimiento sigue ocurriendo en la superficie 2 con el cojinete deslizante en el tope de desplazamiento en la superficie 1. Por lo tanto, combinando las relaciones de desplazamiento

de fuerza para las superficies 1 a 4 obtenemos:

$$F = \frac{W}{R_{eff2} + R_{eff3}} (u - u_{dr4}) + \frac{W}{R_{eff4}} d_4 + F_{f4} \quad (2.31)$$

Esta relación fuerza- desplazamiento se muestra en la figura 2.22. Cuando el movimiento se invierte, el rodamiento se descargará $2F_{f2}(= 2F_{f3})$ y el deslizamiento ocurrirá en las superficies 2 y 3.

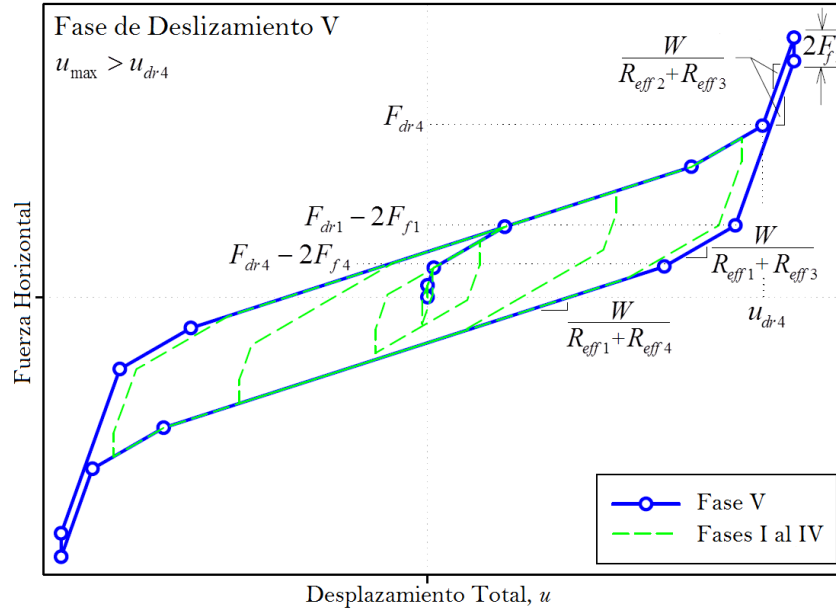


Figura 2.22: Relación fuerza-desplazamiento durante la Fase V

Adoptada de: (Fenz & Constantinou, 2008b)

El movimiento se reanuda en la superficie 1 cuando el aislador se descarga a $F_{dr1} - 2F_{f1}$ y el movimiento se reanuda en la superficie 4 cuando el aislador se descarga a $F_{dr4} - 2F_{f4}$. Dado que el primero es siempre más grande que el segundo (asumiendo la configuración estándar), cuando el aislador se descarga del máximo desplazamiento $u_{m\acute{a}x} > u_{dr4}$, el deslizamiento se iniciará en la superficie 1 antes de la superficie 4.

En las fases IV y V el mecanismo del movimiento define las propiedades del aislador que van mas allá del sismo máximo considerado (MCER).

Las ecuaciones que rigen la relación de fuerza-desplazamiento del aislador triple péndulo para las cinco fases de deslizamiento se resumen en el cuadro 2.4.

Cuadros 2.4: Variables e Indicadores del Estudio

Fase	Descripción de Deslizamiento	Relación Fuerza-Desplazamiento
I	Solo en las superficies 2 y 3	$F = \frac{W}{R_{eff2} + R_{eff3}} u + \frac{F_{f2} R_{eff2} + F_{f3} R_{eff3}}{R_{eff2} + R_{eff3}}$ <p>Válida hasta: $F = F_{f1}$, $u = u^* = (\mu_1 - \mu_2) R_{eff2} + (\mu_1 - \mu_3) R_{eff3}$</p>
II	Se detiene en la superficie 2 e inicia en 1 y 3	$F = \frac{W}{R_{eff1} + R_{eff3}} u + \frac{F_{f1}(R_{eff1} - R_{eff2}) + F_{f2} R_{eff2} + F_{f3} R_{eff3}}{R_{eff1} + R_{eff3}}$ <p>Válida hasta: $F = F_{f4}$, $u = u^{**} = u^* + (\mu_4 - \mu_1) (R_{eff1} + R_{eff3})$</p>
III	Se detiene en las superficies 2 y 3 e inicia en 1 y 4	$F = \frac{W}{R_{eff1} + R_{eff4}} u + \frac{F_{f1}(R_{eff1} - R_{eff2}) + F_{f2} R_{eff2} + F_{f3} R_{eff3} + F_{f4}(R_{eff4} - R_{eff3})}{R_{eff1} + R_{eff4}}$ <p>Válida hasta: $F = F_{dr1} = \frac{W}{R_{eff1}} d_1 + F_{f1}$, $u = u_{dr1} = u^{**} + d_1 \left(1 + \frac{R_{eff4}}{R_{eff1}} \right) - (\mu_4 - \mu_1) (R_{eff1} + R_{eff4})$</p>
IV	En el tope de la superficie 1, se detiene en 3 e inicia en 2 y 4	$F = \frac{W}{R_{eff2} + R_{eff4}} (u - u_{dr1}) + \frac{W}{R_{eff1}} d_1 + F_{f1}$ <p>Válida hasta: $F = F_{dr4} = \frac{W}{R_{eff4}} d_4 + F_{f4}$, $u = u_{dr4} = u_{dr1} + \left[\left(\frac{d_4}{R_{eff4}} + \mu_4 \right) - \left(\frac{d_1}{R_{eff1}} + \mu_1 \right) \right] (R_{eff2} + R_{eff4})$</p>
V	Se limita en las superficies 1 y 4, deslizando en 2 y 3	$F = \frac{W}{R_{eff2} + R_{eff3}} (u - u_{dr4}) + \frac{W}{R_{eff4}} d_4 + F_{f4}$ <p>Asumiendo: (1) $R_{eff1} = R_{eff4} \gg R_{eff2} = R_{eff3}$, (2) $\mu_2 = \mu_3 < \mu_1 < \mu_4$, (3) $d_1 > (\mu_4 - \mu_1) R_{eff1}$, (4) $d_2 > (\mu_1 - \mu_2) R_{eff2}$, (5) $d_3 > (\mu_4 - \mu_3) R_{eff3}$ (Para cada una de las fases)</p>

Adoptada de: (Fenz & Constantinou, 2008b)

2.3.9 Modelado numérico del aislador de triple péndulo friccional.

El comportamiento de histéresis del aislador FPT se simula por un modelo en serie de tres Péndulos Friccionales Simples SFP¹⁵ o independientes.

Se toma como principio combinar elementos no lineales existentes de tal manera que se pueda aproximar el comportamiento general del aislador FPT, utilizando un conjunto de elementos de separación y elementos de péndulos friccionales simples o individuales conectados en serie. Los modelos en serie son aceptados debido a su factible implementación en los programas de análisis estructural disponible actualmente como el SAP2000 y el ETABS, debido a que estos cuentan con elementos no lineales que modelan el comportamiento rígido lineal de los aisladores péndulo friccionales. (Fenz & Constantinou, 2008a)

2.3.9.1 Modelo en serie de tres elementos de péndulo friccional simple.

La Figura 2.23 es una vista esquemática de un modelo en serie de tres elementos de Péndulo Friccional Simple, que tienen la misma fuerza entre sí pero sus desplazamientos relativos son diferentes e independientes. Cada elemento consta de tres miembros paralelos: a) un resorte elástico lineal que representa la fuerza de resistencia de las superficies cóncavas, b) un elemento de fricción plástico rígido con dependencia de la velocidad, y c) un elemento de separación para tener en cuenta la capacidad de desplazamiento finito de cada superficie deslizante. Para cada resorte elástico lineal, la rigidez está dada por $1/\bar{R}_{effi}$ donde, \bar{R}_{effi} es el radio efectivo de curvatura. \bar{d}_i es la capacidad de desplazamiento de cada elemento de separación y para elementos rígidos de fricción plástica, se muestra el coeficiente de fricción dependiente de la velocidad para cada miembro por \bar{u}_i . (Fenz & Constantinou, 2008a; Moeindarbari & Taghikhany, 2012)

¹⁵siglas del inglés Simple Friction Pendulum ó Péndulo Friccional Simple

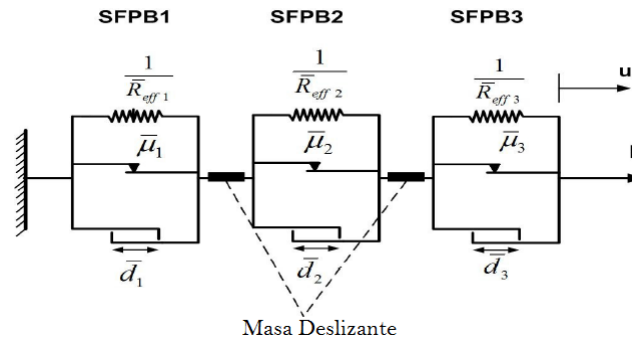


Figura 2.23: Tres elementos simples de FP en serie

Adoptada de: (Fenz & Constantinou, 2008a)

El modelo de serie implementado en los programas ETABS y SAP2000, el modelo en serie consta de un conjunto de elementos de enlace de péndulo de fricción, elementos de separación y viga rígida como se muestra en la Figura 2.24.

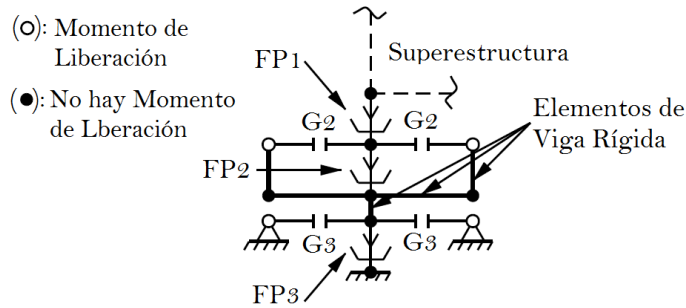


Figura 2.24: Modelo en serie de FPT en ETABS

Adoptada de: (Fenz & Constantinou, 2008a)

El comportamiento histerético resultante obtenido al considerar tres elementos de Péndulo Friccional individuales en serie se muestran en la figura 3-3. Asumiendo que $\bar{F}_{f1} < \bar{F}_{f2} < \bar{F}_{f3} < \bar{F}_{dr2} < \bar{F}_{dr3}$.

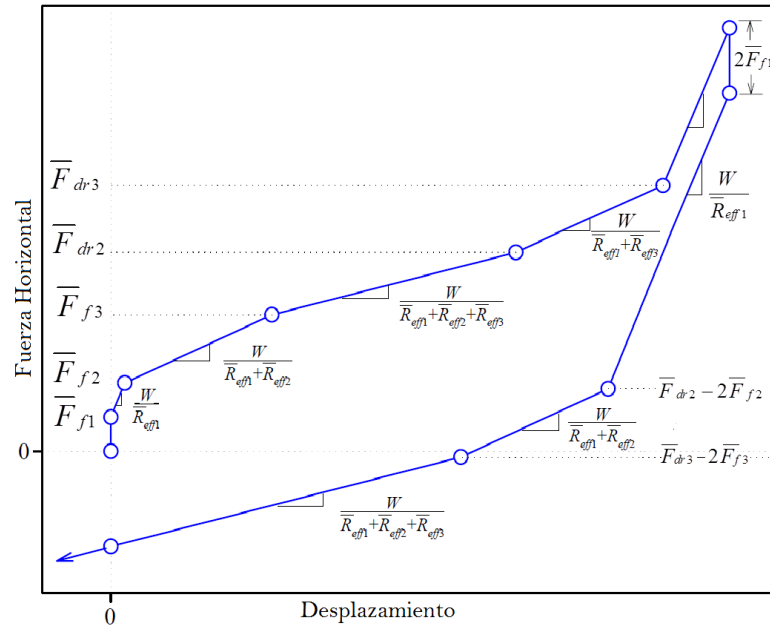


Figura 2.25: Relacion Fuerza-Desplazamiento de tres elementos simples de FP en serie

Adoptada de: (Fenz & Constantinou, 2008a)

El cuadro 2.5 presenta los parámetros del modelo de la serie del aislador Triple Péndulo Friccional en ETABS. (Sarlis & Constantinou, 2010)

Cuadros 2.5: Parámetros del modelo en serie del aislador FPT

Elemento	Coefficiente de Fricción	Radio de Curvatura	Capacidad de Desplazamiento (Nominal)	Parámetro de Velocidad
FP1	$\bar{\mu}_1 = u_2 = u_3$	$\bar{R}_{eff1} = R_{eff2} + R_{eff3}$	$\bar{d}_1 = d_{tot}^1 - (\bar{d}_2 + \bar{d}_3)$	$\bar{a}_1 = \frac{1}{2} \frac{(a_2 + a_3)}{2}$
FP2	$\bar{\mu}_2 = u_1$	$\bar{R}_{eff2} = R_{eff1} - R_{eff2}$	$\bar{d}_2 = \frac{R_{eff1} - R_{eff2}}{R_{eff1}} d_1$	$\bar{a}_2 = \frac{R_{eff1}}{R_{eff1} - R_{eff2}} a_1$
FP3	$\bar{\mu}_3 = u_4$	$\bar{R}_{eff3} = R_{eff4} - R_{eff3}$	$\bar{d}_3 = \frac{R_{eff4} - R_{eff3}}{R_{eff4}} d_4$	$\bar{a}_3 = \frac{R_{eff4}}{R_{eff4} - R_{eff3}} a_4$

Adoptada de: (Fenz & Constantinou, 2008a)

2.3.10 Efecto $P - \Delta$ en aisladores triple péndulo de fricción.

Los efectos p-delta de acuerdo al análisis realizado de (Sarlis & Constantinou, 2010), tienen incidencia menor en cuanto a los desplazamiento lateral de los pisos por lo que pueden no ser considerados, debido a que el sistema del aislador es un sistema pendular,

sin embargo, si se desea es posible explicar aproximadamente estos efectos realizando dos análisis como se describe a continuación:

- Realizar un análisis no lineal de respuesta en el tiempo, obtener las cargas axiales en el aislador y los desplazamientos laterales. Calcular el momento que es igual a la mitad de la carga axial multiplicada por el desplazamiento; tenga en cuenta que la componente del momento resultante de la fuerza de corte el programa cuenta directamente con la altura y no es necesario agregarla a la componente de fuerza axial.
- El análisis del historial de respuesta dinámica se realiza con el momento $P - \Delta$ calculado aplicado en las uniones superior e inferior de cada aislador y asegurando que la dirección de los momentos es tal que causa una fuerza de corte en la misma dirección que el desplazamiento del aislador. Tenga en cuenta que el momento $P - \Delta$ en las uniones inferiores no es necesario.

2.3.11 Propiedades para aisladores triple péndulo de fricción.

2.3.11.1 Configuración de las unidades de aislación.

La determinación de la configuración en planta y en elevación¹⁶ de los aisladores, dependen de las características del proyecto especialmente del terreno en el cual se ubica el proyecto. Sin embargo existen algunos criterios que se pueden adoptar:

Recomendaciones para la configuración en planta:

- Distribuir los aisladores de tal manera que las cargas axiales que soportan sean similares para que todos requieran la misma capacidad axial.
- En edificaciones con un sistema de pórticos, los aisladores, por lo general se ubican en cada columna.
- En edificaciones con un sistema estructural dual o de muros estructurales, es posible que se requiera de dos o más aisladores a lo largo de cada muro, sin embargo no es recomendable optar por muros en un sistema estructural ya que concentran esfuerzos en algunos aisladores, dando lugar a optar el uso de más de un tipo de aislador.

¹⁶elevación de la interfaz de aislación

Recomendaciones para la configuración en elevación de la interfaz de aislación: (V. Zayas, Low & Mahin, 1990) presenta tres configuraciones para la interfaz de aislación; de la figura 2.26, la interfaz de aislación se ubica en, a) entre la cimentación y la losa del primer piso, b) en la parte inferior de la columna y c) en la parte superior de la columna.

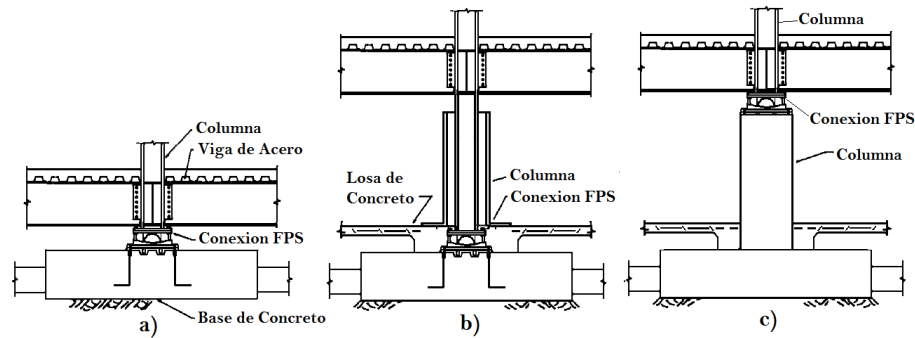


Figura 2.26: Detalle de la interfaz de aislación

Adoptada de: (V. Zayas et al. 1990)

Adicionalmente a estas configuraciones pueden utilizarse otras variantes dependiendo de lo que se requiera en el proyecto.

2.3.11.2 Características geométricas.

Los aisladores están definidos por las siguientes propiedades geométricas presentadas en la sección 2.3.11, mostradas en la figura 2.11. Los valores de estas propiedades están definidos por:

- **Altura h_i :**

- Para garantizar la estabilidad del aislador, la relación de aspecto del deslizador rígido debe ser menor que 1.0, esto es:

$$\frac{h_2+h_3}{D_R} \leq 1,0$$

Donde D_R es el diámetro del deslizador rígido, el cual puede ser aproximado con la siguiente ecuación:

$$D_R = \sqrt{\frac{4A_R}{\pi}} \quad A_R \geq \frac{P}{\sigma_{\text{máx}}}$$

Donde P , es la fuerza axial máxima incluyendo efectos sísmicos; $\sigma_{\text{máx}}$, es el esfuerzo máximo, 60ksi (Richins, 2011). Citado en (Cango, 2018).

- El espesor en el centro de las placas 2 y 3, debe ser al menos 1 pulgada, además:

$$h_1 + h_4 \geq h_2 + h_3 + 2in$$

- **Radio de curvatura R_i :**

Los radios de curvatura deben cumplir que: $R_1 = R_4 \gg R_2 = R_3$, además:

- $R_1 = R_4$: estos valores deben tomarse del cuadro 2.6¹⁷, el cual muestra un valor asociado del diámetro de la superficie cóncava externa D_C que representa la capacidad de desplazamiento del aislador y se analiza en el paso D.
- $R_2 = R_3$: se recomienda adoptar radios efectivos presentados en el manual (SEAO, 2014), estos son: 5.5, 12, 23, y 33 pulgadas estos valores nos brindan un amplio rango de posibilidades de diseño.
- Con respecto a los diámetros de la superficie cóncava interna D_S se fabrican en el rango de 6 a 65 pulgadas. (*M. C. Constantinou, Kalpakidis, Filiatrault & Ecker Lay, 2011*)

¹⁷El cuadro presenta información sobre dimensiones FPS, teniendo placas cóncavas que ya han sido producidas y utilizadas en puentes y otros proyectos, se debe tener en cuenta que estas placas cóncavas se podrían usar en configuraciones de un solo péndulo friccional o podrían ser combinadas en configuraciones dobles y triples.

Cuadros 2.6: Dimensión estandar de placas concavas en aisladores FPS

Id.	Radio de curvatura (in) ($R_1 = R_4$)	Diámetro de las superficies cóncavas (D_C) (in)
1		14
2		18
3	61	22
4		31
5		36
6		27
7		31
8		33
9		36
10	88	39
11		41
12		44
13		46
14		51
15		56
16		27
17	120	56
18		63
19		70
20	156	106
21		124
22		78
23		94
24	238	106
25		131
26		143

Adoptada de: (M. C. Constantinou et al. 2011)

- **Coefficientes de Fricción μ_i :**

La fricción natural disipa la energía cinética del sistema como energía térmica. Lógicamente, los materiales de fricción generarán cantidades sustanciales de calor, lo que a su vez puede conducir a cambios en la fricción y desgaste excesivo.

El coeficiente de fricción nominal se define como el rango de valores del coeficiente para temperatura normal y sin efectos por envejecimiento, contaminación e historial de carga, es decir, para un aislador nuevo a temperatura normal. Los valores nominales del coeficiente de fricción dependen de 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 el tamaño del control deslizante. (M. C. Constantinou et al. 2011)

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

- Durante el primer ciclo de movimiento sísmico, μ_{1c} , se asume que $\mu_{1c} = 1,2\mu_{3c}$, para μ_{3c} debe asignarse el mayor valor nominal dentro del rango de valores.
- μ_{3c} , es el valor determinado como el coeficiente de fricción promedio durante los tres primeros ciclos de movimiento sísmico, existe incertidumbre en los valores nominales por lo que el ingeniero debe hacer algunas suposiciones sobre el rango de valores.

Por ejemplo, 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) han sido utilizado para aproximar 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 2.32, donde P está en unidades de *ksi*, citado en (M. C. Constantinou et al. 2011):

$$\mu_{3c} = 0,122 - 0,01P \quad (2.32)$$

- Sin embargo para las superficies cóncavas externas $\mu_1 < \mu_4$: se puede usar rangos desde 3 % a 10 %. Estos coeficientes de fricción son los que más influyen en el comportamiento global de la estructura (hablando en términos de desplazamientos y cortantes basales) ya que, estos son los encargados de disipar la energía ante sismos de diseño (SEAOC, 2014).
- Para las superficies cóncavas internas $\mu_2 = \mu_3$: se pueden usar rangos desde 1 % a 2 %. Estos coeficientes de fricción, al ser relativamente pequeños, no tienen gran influencia en el comportamiento global de la estructura, aunque se vuelven muy importantes hablando en términos de aceleraciones de piso.

Uno de los efectos mas importantes que influyen en el coeficiente de fricción es la temperatura, de acuerdo a experimentos realizados en (M.C. Constantinou, Whittaker, Kalpakidis, Fenz & G.P., 2007), donde se utilizaron temperaturas de 50°C, 20°C, -40°C. Para velocidades bajas y en la temperatura de 50 a -40 se presenta un incremento aproximado de la fricción (μ_B y $f_{m\acute{a}x}$) de 7 veces, este aumento sustancial es debido al

efecto de las propiedades viscoelásticas cambiantes de PTFE¹⁸ debido a la temperatura. El flujo de calor generado por la fricción es proporcional al coeficiente de fricción, presión media y velocidad de deslizamiento. El calentamiento por fricción sustancial de la interfaz deslizante se produce a grandes velocidades (500 mm/s). El valor del coeficiente de fricción a velocidades altas ($f_{m\acute{a}x}$) aumenta aproximadamente solo en un 50% a medida que la temperatura disminuye de 20 °C a -40 °C. La Figura 2.271 ilustra el coeficiente de fricción en función de la velocidad de deslizamiento para 3 temperaturas.

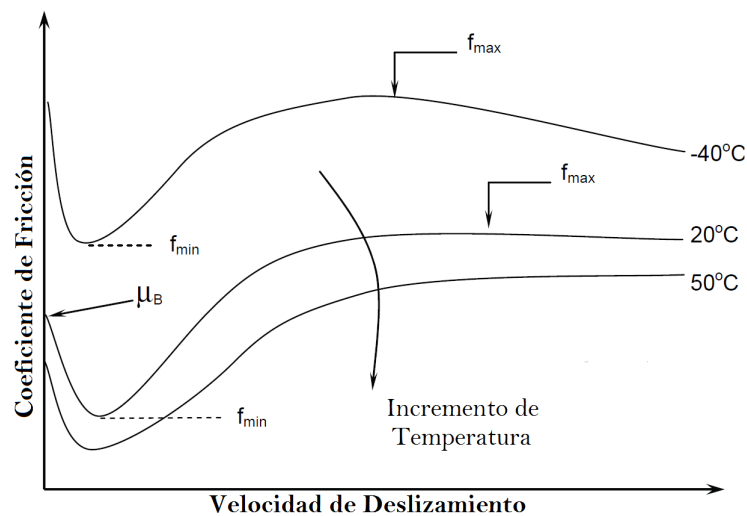


Figura 2.27: Efecto de la temperatura en las propiedades de fricción.

Adoptada de: (M.C. Constantinou et al. 2007)

- **Propiedades superiores e inferiores de los aisladores FPS:**

- Deben calcularse los valores límite inferiores “**Lower Bound**” de la resistencia característica de los aisladores FPS utilizando el valor nominal más bajo del coeficiente de fricción durante los primeros tres ciclos (promedio de tres ciclos) del movimiento sísmico
- Los valores límite superiores “**upper bound**” de la resistencia característica de los los aisladores FPS deben calcularse utilizando el valor nominal del coeficiente de fricción durante el primer ciclo del movimiento sísmico y multiplicado por el

¹⁸El politetrafluoroetileno (PTFE), conocido comunmente como teflon, es un polímero de comportamiento viscoelastico que se utiliza en la Fabricación de aisladores FPS

factor de modificación de la propiedad del sistema para los efectos combinados del envejecimiento, la contaminación y la baja temperatura.

2.3.11.3 Capacidad de restitución.

La capacidad de restitución es controlada por el radio de curvatura y el coeficiente de fricción. Por definición la fuerza de restitución es:

$$F_{res} = 0,5K_b \cdot D_M \quad (2.33)$$

$$F_{res} = 0,5 \frac{W}{R_{eff}} \cdot D_M \quad (2.34)$$

Donde F_{res} es la fuerza de restitución, K_b es la rigidez post-fluencia, que es igual a W/R_{eff} , D_M es el desplazamiento máximo.

La fuerza de restitución es inversamente proporcional al radio de curvatura, por otro lado, la dependencia entre el coeficiente de fricción y la fuerza de restitución está implícita en el desplazamiento D_M , esto sabiendo que un incremento del coeficiente de fricción, incrementa el amortiguamiento y en consecuencia se reduce el desplazamiento. Esto significa que, a mayor coeficiente de fricción, menor capacidad de restitución.

Para entender mejor este tema, (V. Zayas et al. 1990) presenta curvas de histéresis de ensayos en aisladores de péndulo simple que tiene el comportamiento base del aislador triple péndulo, en los que se ha variado el periodo (T) y el coeficiente de fricción (μ). La variación del periodo se sobreentenderá como la variación del radio de curvatura ya que se demostró que $T = 2\pi\sqrt{R_{eff}/g}$ y por lo tanto si crece el radio también crece el periodo. Concluyendo que no es recomendable combinar radios de curvatura y coeficientes de fricción grandes ya que la fuerza de restitución se reduce de manera significativa. Pero, en términos cualitativos, si se podría combinar, radios de curvatura grandes con coeficientes de fricción pequeños y Radios de curvatura pequeños con coeficientes de fricción grande. (V. Zayas et al. 1990; Cango, 2018)

2.3.11.4 Capacidad de Desplazamiento.

Se ha elegido un aislador FPT que posee: alturas $h_2 = h_3 < h_1 = h_4$; radios de curvatura $R_2 = R_3 < R_1 = R_4$ y coeficientes de fricción $\mu_2 = \mu_3 < \mu_1 \leq \mu_4$ que responde con un desplazamiento D_M y cortante basal V_M . Con esta información se procede a determinar las

capacidades de desplazamiento $d_2 = d_3 < d_1 = d_4$ que requiere el aislador para acomodar el desplazamiento D_M .

- **Capacidad de desplazamiento, placas internas $d_2 = d_3$:**

$$d_2 > (\mu_1 - \mu_2)R_{eff2} \quad (2.35)$$

$$d_3 > (\mu_4 - \mu_3)R_{eff3} \quad (2.36)$$

Estas desigualdades son requeridas para lograr las 5 fases de movimiento en el aislador de triple péndulo que se describió en la Sección 2.3.8.

- **Capacidad de desplazamiento, placas externas $d_1 = d_4$:**

La norma ASCE7-16, requiere que un aislador se diseñe para tener una capacidad de desplazamiento de al menos D_{TM} (desplazamiento total máximo). Por lo tanto $d_1 = d_4$ se calcula para tener una capacidad de desplazamiento D_{TM} . (Cango, 2018)

Conocemos que el aislador esta operable hasta la fase IV, por lo que el aislador FPT se diseña para que opere en la fase III o IV. Por tanto debe cumplirse que:

- Fase III, si $D_{TM} \leq u_{dr1}$
- Fase IV, si $D_{TM} \leq u_{dr4}$

$d_1 = d_4$ se calcula de la siguiente manera en la fase III, siendo análoga su cálculo en la fase IV. Despejando d_1 de la desigualdad en la fase III:

$$d_1 \geq \left[\frac{D_{TM} - 2(\mu_1 - \mu_2)R_{eff2} + (\mu_4 - \mu_1)(R_{eff1} - R_{eff2})}{2} \right] \frac{R_1}{R_{eff1}} \quad (2.37)$$

La ecuación simplificada se da cuando se asume que únicamente las placas 1 y 4 proveen la capacidad de desplazamiento D_{TM} :

$$d_1 \geq \left(\frac{D_{TM}}{2} \right) \frac{R_1}{R_{eff1}} \quad (2.38)$$

Con esta ecuación, si $\mu_4 \approx \mu_1$, entonces el aislador opera en la fase III, caso contrario puede operar en la fase III o IV.

En las dos ecuaciones se puede ver que el término de la derecha se encuentra multiplicado por un factor R_1/R_{eff1} , esto se realiza para considerar la reducción de la capacidad de desplazamiento por la rotación de las placas.

- **Dimensiones en Planta** Con la finalidad de tener una idea del tamaño que va tener el aislador se calcula D_S y D_C .

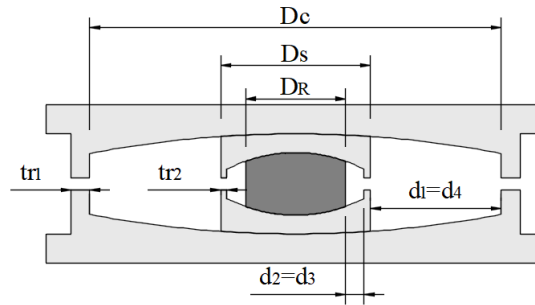


Figura 2.28: Nomenclatura del aislador FPT

Adoptada de: (Cango, 2018)

- Diámetro de las placas internas deslizantes D_S :

$$D_S = D_R + 2t_{r2} + d_2 + d_3$$

t_{r2} , es el espesor del anillo de retención o tope de desplazamiento de la placa 2 que es igual en la placa 3.

- Diámetro de las placas externas D_C :

$$D_C = D_S + d_1 + d_4$$

2.3.12 Contacto con el Fabricante del Aislador FPT.

Luego de realizar el diseño preliminar, es necesario contactar con el fabricante de aisladores FPT con la finalidad de verificar la disponibilidad de un aislador con las características del diseño preliminar, especialmente de radios de curvatura (equivalente al periodo) y coeficientes de fricción (equivalente al amortiguamiento). En el caso que no disponer de un aislador con iguales características, es probable que el fabricante proporcione información de un aislador con similares características o recomendara usar un aislador con mejores características al diseñado. Este procedimiento debe ser realizado obligatoriamente, porque luego de este punto, se debe realizar el análisis sísmico de la estructura.

2.3.12.1 Nomenclatura que Identifica el Aislador FPT.

Earthquake Protection Systems (EPS) es la empresa que fabrica el aislador de triple péndulo, debido a que tiene patentado este producto. La nomenclatura que emplea EPS para identificar sus aisladores es la siguiente:

$$FPT R_o D_c / D_S - R_i / D_R - h_R$$

Donde, tomando en cuenta la figura 2.28:

R_o : Radio de curvatura de las superficies externas ($R_1 = R_4$)

D_c : Diámetro de las superficies cóncavas externas.

D_S : Diámetro del aislador interno.

R_i : Radio de curvatura de las superficies internas ($R_2 = R_3$).

D_R : Diámetro del deslizador rígido.

h_R : Altura del deslizador rígido $2h_2 = 2h_3$

Adoptado de: (Michael Constantinou, Aguiar, Morales & Caiza, 2016)

Por ejemplo, el aislador FPT 15663/22-20/16-8 que se presenta en (Victor Zayas, Mahin & Constantinou, 2016), Figuras 2.29 y 2.30, tiene la siguiente geometría:

$$\begin{array}{lll} R_o = 156'' & D_C = 63'' & D_S = 22'' \\ R_i = 20'' & D_R = 16'' & h_R = 8'' \end{array}$$

Esto corresponde a:

$$\begin{array}{lll} R_1 = R_4 = 156'' & h_1 = h_4 = \frac{12''}{2} = 6'' & d_1 = d_4 = \frac{D_C - D_S}{2} = 20,5'' \\ R_2 = R_3 = 20'' & h_2 = h_3 = \frac{h_R}{2} = 4'' & d_2 = d_3 = \frac{D_S - D_R - 2t_{r2}}{2} = 2,5'' \end{array}$$

Se considera que $t_{r2} = 0,5''$

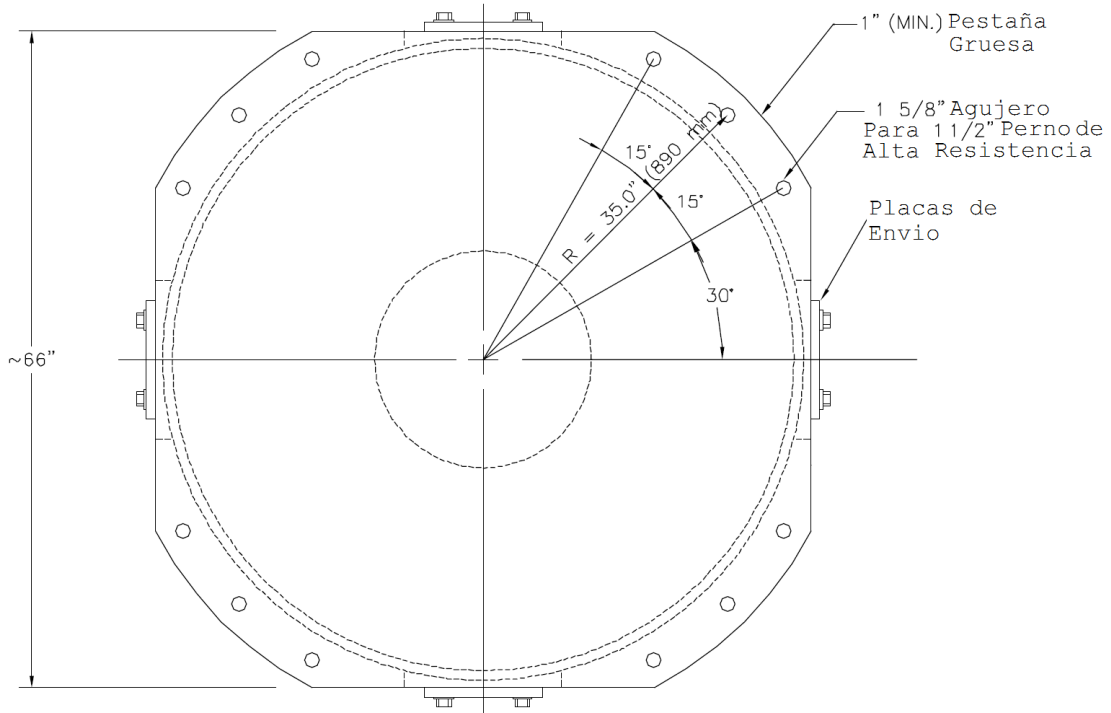


Figura 2.29: Vista en planta del aislador FPT

Adoptada de: (Victor Zayas et al. 2016)

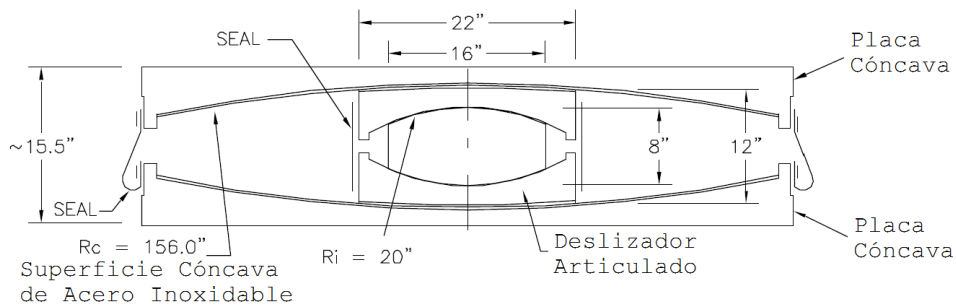


Figura 2.30: Sección transversal del aislador FPT

Adoptada de: (Victor Zayas et al. 2016)

2.3.13 Análisis sísmico.

Realizaremos el análisis sísmico considerando los procedimientos de la norma (ASCE, 2016), capítulo 17 “Requisitos de Diseño Sísmico para Estructuras Sísmicas Aisladas”, el cual requiere que el sistema de aislamiento sea diseñado para adaptarse a la demanda de desplazamiento calculado en el Sismo Máximo Considerado (MCE_R)¹⁹, donde este

¹⁹MCE_R, del inglés Maximum Considered Earthquake o también Terremoto considerado máximo

desplazamiento es el promedio de los valores máximos calculados en siete historiales de respuesta no lineal.

Para el caso de la norma ASCE/SEI 7-10, las fuerzas y las derivas para el diseño se basan en cálculos utilizando el espectro de respuesta de diseño (DE), que se define como 2/3 del espectro del sismo máximo considerado MCE_R . Para el caso de la norma ASCE / SEI 7-16, las fuerzas y las desviaciones para el diseño se basan en cálculos utilizando el espectro MCE_R . (*Kitayama & Constantinou, 2018*)

A continuación se presenta las consideraciones de diseño de estructuras aisladas en el ASCE/SEI 2016:

2.3.13.1 Definiciones:

- **Nivel Básico:** Primer nivel de la estructura aislada por encima de la interfaz de aislamiento.
- **Interfaz de Aislamiento:** Límite entre la parte superior de la estructura, que se aísla, y la parte inferior de la estructura, que se mueve de forma rígida con el suelo.
- **Sistema de aislamiento:** La colección de elementos estructurales que incluye todas las unidades de aislamiento individuales.
- **Unidad de Aislador:** Elemento estructural horizontalmente flexible y verticalmente rígida del sistema de aislamiento que permite grandes deformaciones laterales bajo carga sísmica de diseño.
- **Desplazamiento máximo:** El desplazamiento máximo lateral, con exclusión de desplazamiento adicional causada por la torsión real y accidental, requerida para el diseño del sistema de aislamiento.
- **Desplazamiento Máximo Total:** Desplazamiento total máximo lateral, incluyendo el desplazamiento adicional causada por la torsión real y accidental, requerido para verificación de la estabilidad del sistema de aislamiento o elementos de los mismos, el diseño de las separaciones de la estructura, y las pruebas de carga vertical de prototipos unidad del aislador.
- **Scragging:** Degradación temporal de las propiedades mecánicas de rigidez debido a una carga cíclica o de trabajo.

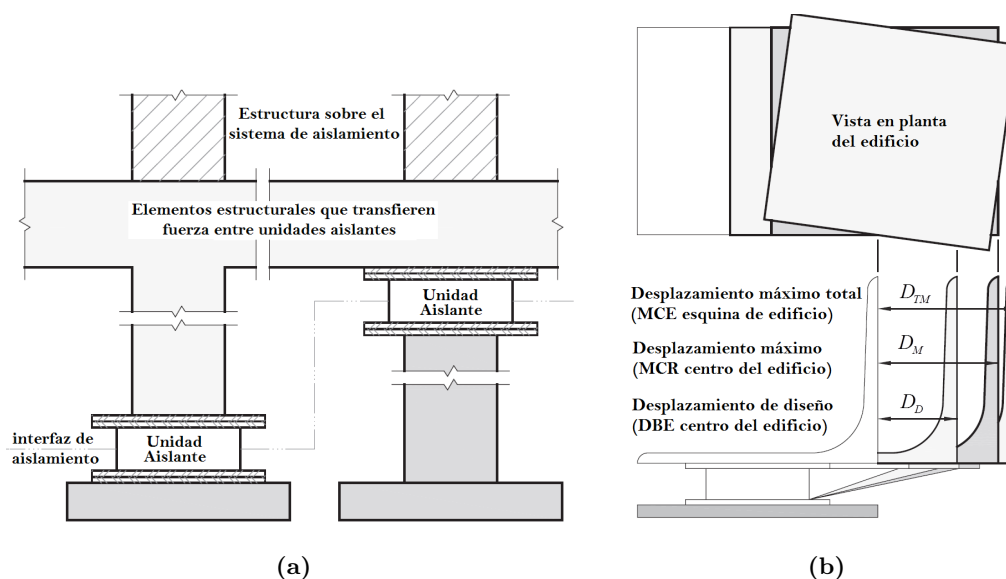


Figura 2.31: Terminología del sistema de aislación y desplazamientos

Adoptada de: (ASCE, 2016)

2.3.13.2 Capacidad de restitución.

Es la fuerza generada por el peso para volver a su posición inicial. El sistema debe configurarse, para un límite superior “upper bound” e inferior “lower bound” de propiedades del sistema de aislación, para producir una fuerza de restauración tal que la fuerza lateral en el desplazamiento máximo correspondiente es al menos $0,025W$ mayor que la fuerza lateral al 50 % del desplazamiento máximo correspondiente. Con esto se evita los desplazamientos permanentes ante eventos sísmicos. (ASCE, 2016), sección 17.2.4.4

$$F_{res} = F(D_M) - F(0,5D_M) > 0,025W \quad (2.39)$$

En sistemas de aislación de comportamiento histerético bilineal la fuerza de restitución es:

$$F_{res} = \frac{1}{2} K_d \cdot D_M > 0,025W \quad (2.40)$$

Donde K_d es la rigidez post fluencia del sistema de aislación. Para determinar la fuerza de restitución en sistemas de aislación con aisladores FPT, se sabe que el sistema de aislación opera en la fase III del movimiento, en la que se encuentra el desplazamiento máximo D_M .

$$F_{res} = \frac{1}{2} K_3 \cdot D_M > 0,025W \quad (2.41)$$

Donde, K_3 , es la rigidez post fluencia en la fase III de movimiento:

$$K_3 = \frac{W}{R_{eff1} + R_{eff4}}$$

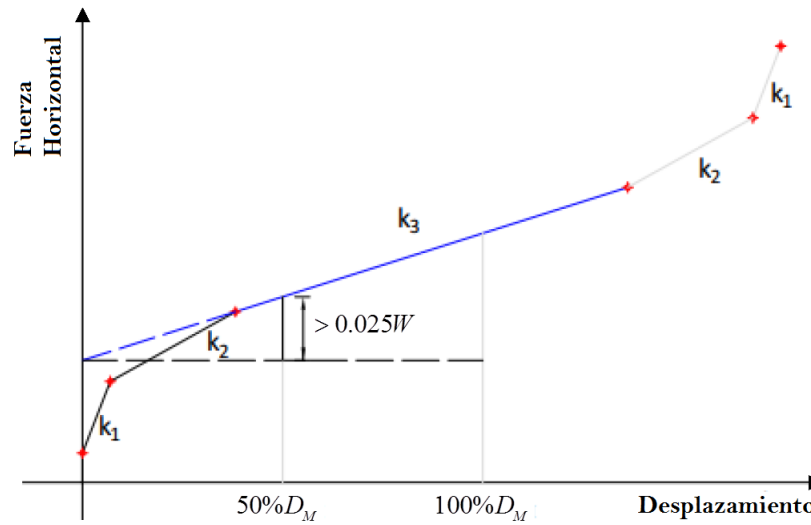


Figura 2.32: Fuerza de restitución en aisladores FPT que opera en la fase III

Adoptada de: (Cango, 2018)

2.3.13.3 Factores de modificación de propiedades del sistema de aislamiento.

Los factores máximos y mínimos de modificación de propiedad λ se deben usar por la variación de los parámetros de diseño nominales de cada tipo de unidad de aislamiento de acuerdo con las ecuaciones 2.42 y 2.43, respectivamente. Para los efectos del calentamiento causado por movimiento dinámico cíclico, velocidad de carga, scragging y recuperación λ_{test} ; variabilidad en las propiedades de soporte de producción λ_{spec} , temperatura, envejecimiento y exposición ambiental λ_{ae} . Estos factores se establecen a partir de los factores de modificación que además sirven para establecer los límites superior e inferior, Upper Bound (UB) y Lower Bound (LB) del sistema de aislación, que son necesarios para definir los dos modelos de análisis:

$$\lambda_{m\acute{a}x} = (1 + 0,75 (\lambda_{(ae,m\acute{a}x)} - 1)) * \lambda_{(test,m\acute{a}x)} * \lambda_{(spec,m\acute{a}x)} \geq 1,8 \quad (2.42)$$

$$\lambda_{m\acute{i}n} = (1 - 0,75 (1 - \lambda_{(ae,m\acute{a}x)})) * \lambda_{(test,m\acute{i}n)} * \lambda_{(spec,m\acute{i}n)} \leq 0,6 \quad (2.43)$$

En los aisladores FPT (y en general de los FPS), los factores $\lambda_{m\acute{a}x}$ y $\lambda_{m\acute{i}n}$ se aplican únicamente en los coeficientes de fricción debido a que son la única fuente de incertidumbre en este tipo de sistemas de aislación.

2.3.14 Movimiento Sísmico

2.3.14.1 Peligro Sísmico y Espectros de respuesta

Los parámetros de aceleración espectral S_{DS} la determinaremos de acuerdo con la sección 4.6.2 de la norma técnica peruana E-030, con esto consideramos la peligrosidad sísmica en el Perú. Con un valor de $R=1$.

Para determinar la relación entre el espectro de respuesta para el sismo máximo considerado MCE_R^{20} y el espectro de diseño para el sismo base de diseño DBE^{21} para el sitio de interés, usaremos la relación de la secciones 11.4.5 establecidos en el ASCE,2016.

$$S_{DS} = \frac{2}{3} S_{MS} \quad (2.44)$$

Donde S_{MS} es la aceleración de respuesta espectral para el sismo considerado máximo MCE_R , S_{DS} es la aceleración de respuesta espectral para el sismo de diseño DBE , ambos para un 5 % de amortiguamiento.

2.3.14.2 Registros de aceleración sísmica.

Se considera un mínimo de 7 pares de registros sísmicos que deben estar escalados al espectro de aceleraciones MCE_R que tiene una probabilidad de excedencia de 2 % en 50 años. (ASCE, 2016)

Cada par de movimientos se escalará de tal manera que en el período este en el rango de $0,75T_M$ (T_M es el periodo fundamental de la estructura), determinado usando propiedades de límite superior del sistema de aislamiento, a $1,25T_M$, determinado usando propiedades de límite inferior del sistema de aislamiento. El promedio de los espectros SRSS²² de todos los pares de componentes horizontales no cae por debajo de la correspondiente ordenada del espectro de respuesta utilizado en el diseño (MCE_R)

2.3.15 Procedimientos de análisis.

La normativa del ASCE/SEI 7-16, en su sección 17.4, presenta 3 procedimientos de análisis:

²⁰ MCE_R , del ingles Maximum Considered Earthquake que significa Terremoto considerado máximo

²¹ DBE , del ingles Design Basis Earthquake que significa Terremoto Base de Diseño

²²SRSS, (Square Root Sum of Squares) también denominado máximo valor probable, es un criterio para

promedio de respuestas definida por $r = \sqrt{\sum_{i=1}^n r_i^2}$

- Procedimiento de Fuerza Lateral Equivalente - ELF (Método Estático)
- Procedimiento de Análisis del Espectro de Respuesta (Método Dinámico)
- Procedimiento de Análisis del Historial de Respuestas - NLRHA (Método Dinámico)

De los cuales el procedimiento de análisis del espectro de respuesta no se utilizará para el diseño de una estructura aislada sísmicamente.

2.3.16 Procedimiento de fuerza lateral equivalente.

Este procedimiento, en muchos aspectos es similar al utilizado para edificios convencionales, produce la resistencia y desplazamiento de diseño para el sistema de aislamiento y un vector de fuerzas sísmicas equivalentes para el diseño de la superestructura. (R. Aguiar et al. 2016)

El método considera que la estructura aislada es lo suficientemente rígida de tal manera que se puede ignorar su flexibilidad. De esta manera el análisis sísmico se realiza asumiendo a la estructura aislada como un modelo de 1 GDL. (Cango, 2018)

2.3.16.1 Desplazamientos laterales mínimos requeridos para el diseño.

El sistema de aislamiento deberá ser diseñado y construido para soportar, como mínimo, el desplazamiento máximo, DM .

$$D_M = \frac{gS_{M1}T_M}{4\pi^2 B_M} \quad (2.45)$$

$$T_M = 2\pi \sqrt{\frac{W}{K_M g}} \quad (2.46)$$

$$B_M = \left(\frac{\beta_M}{0,05} \right)^{0,3} \quad (2.47)$$

$$K_M = \frac{\sum |F_M^+| + \sum |F_M^-|}{2D_M} \quad (2.48)$$

$$\beta_M = \frac{\sum E_M}{2\pi K_M D_M^2} \quad (2.49)$$

Las variables adicionales son g como la aceleración de gravedad, S_{M1} es el parámetro de aceleración espectral en periodo de 1 segundo; T_M es el periodo efectivo de la estructura sísmicamente aislada, en el desplazamiento D_M ; B_M es el coeficiente numérico para el

amortiguamiento efectivo β_M , en el desplazamiento D_M ; W es la carga sísmica efectiva de la estructura sobre la interface de aislación, K_M es la rigidez efectiva del sistema de aislación en el desplazamiento máximo D_M , $\sum E_M$ es la energía total disipada en un ciclo de histéresis, F_M^+ y F_M^- es la suma, para todas unidades de aisladores, del valor de fuerza absoluta en un desplazamiento positivo y negativo igual a D_M .

Los valores recomendados de B_M por la ASCE 7-16 se muestran en el Cuadro 2.7.

Cuadros 2.7: Valores para B_M en el amortiguamiento efectivo β_M

Amortiguamiento efectivo, β_M %	≤ 2	5	10	20	30	40	≤ 50
Factor de Amortiguamiento, B_M	0.8	1.0	1.2	1.5	1.7	1.9	2.0

Adoptada de: (ASCE, 2016)

El desplazamiento máximo total, D_{TM} , incluye el desplazamiento adicional causado por la torsión real y accidental. Viene dada por la ecuación 17.5-3 del ASCE 2016, no consideramos esta ecuación debido a que los aisladores FPS tiene la capacidad de minimizar hasta eliminar los efectos torsionales (FEMA, 2016; SEAOC, 2014), por lo que $D_M = D_{TM}$, pero como $D_{TM} \geq 1,15D_M$, consideraremos $D_{TM} = 1,15D_M$.

2.3.16.2 Fuerzas laterales mínimas requeridas para el diseño.

El sistema de aislamiento, la base y todos los elementos estructurales por debajo del nivel de base deberá ser diseñado y construido para resistir una fuerza sísmica lateral mínima, V_b , Ec. 2.50 Los elementos estructurales por encima del nivel de base, deberá ser diseñado y construido utilizando todos los requisitos aplicables en una estructura no aislada para una fuerza de corte mínima, V_s , ec. 2.51. Determinada utilizando propiedades de sistema de aislamiento de límite superior e inferior.

$$V_b = K_M D_M \quad (2.50)$$

$$V_s = \frac{V_{st}}{R_I} \quad (2.51)$$

$$V_{st} = V_b \left(\frac{W_s}{W} \right)^{(1-2,5\beta_m)} \quad (2.52)$$

Dónde: R_I es el coeficiente numérico relacionado con el tipo de resistencia sísmica de la superestructura, que se puede tomar como $3/8R$, con $1,0 < R_I < 2,0$; V_{st} es la fuerza

cortante no reducida sobre elementos por encima del nivel de base; W , peso sísmico efectivo de la estructura sobre la interfaz de aislamiento; W_s , peso sísmico efectivo de la estructura sobre la interfaz de aislamiento, excluyendo el peso sísmico efectivo del nivel base.

El valor de V_s no se tomará como menos que cada uno de los siguientes:

- La fuerza sísmica lateral requerida por la Sección 12.8 del ASCE 2016 para una estructura de base fija del mismo peso sísmico efectivo, W_s , y un período igual al período del sistema de aislamiento utilizando las propiedades de límite superior T_M .
- El cortante en la base correspondiente a la carga de viento de diseño factorizada.
- La fuerza lateral V_{st} , calculado usando la Ecuación 2.52 con V_b igual a la fuerza requerida para activar completamente el sistema de aislación, usando las propiedades del límite superior o de Upper Bound .
 - 1.5 veces las propiedades nominales para el nivel de fluencia de un sistema de ablandamiento.
 - La capacidad máxima de un sistema sacrificial de contención de viento.
 - Fuerza de fricción de rotura en un sistema de deslizante
 - La fuerza en el desplazamiento cero de un sistema deslizante después de un ciclo dinámico completo de movimiento en D_M .

2.3.17 Procedimiento de análisis del historial de respuestas.

El análisis de la historia se realizará para un conjunto de pares de registros sísmico, pares seleccionados y escalados de acuerdo con la Sección 17.3.3. del ASCE 2016, especificado en la sección 2.3.14.2 de la presente investigación. Cada par de componentes de movimiento del suelo se aplicará simultáneamente al modelo, considerando las más desfavorables. El máximo desplazamiento del sistema de aislamiento se calculará a partir de la suma vectorial de los dos desplazamientos ortogonales en cada uno.

Los parámetros de interés se calcularán para cada sismo seleccionado escalado para el análisis del historial de respuestas, y el promedio del valor del parámetro de respuesta de interés se utilizará para el diseño.

Sobre las fuerzas laterales mínimas para el diseño:

- Sistema de aislamiento y elementos estructurales debajo del Nivel básico. Sección 17.6.4.1 del ASCE 2016, indica que la fuerza lateral de diseño no debe tomarse como menos del 90 % de V_b determinado por Ec. 2.50.
- Elementos estructurales por encima del nivel base. Sección 17.6.4.2 del ASCE 2016, indica que la cortante basal V_s ; en estructuras regulares se admite como mínimo el 80 % V_s , en estructuras irregulares se admite como mínimo el 100 % V_s , V_s es el valor calculado con la ecuación 2.51 del método de Fuerza Lateral Equivalente (ELF), además V_s no será tomado como menos del 100 % de los límites especificados en la sección 17.5.4.3 del ASCE 2016.

Método de la investigación.

3.1 Enfoque.

Según la información analizada, la investigación se puede clasificar en un enfoque cuantitativo.

La investigación cuantitativa es de carácter objetivo, pues se dedica a recopilar, procesar y analizar datos de diversos elementos que se pueden contar, cuantificar o medir apartir de una muestra en estudio. Pretende estudiar la relacion entre las variables previamente determinadas en una hipotesis con las que trata de formular explicaciones para probar una hipotesis con base en la medicion numérica con el fin de establecer pautas de comportamiento y probar teorías. (*Muñoz, 2011*)

La presente investigación se desarrolla desde un enfoque cuantitativo, sosteniendose en un planteamiento de estudio delimitado y concreto, el cual promovió establecer nuestros objetivos y preguntas de investigación, se revisó la literatura y se construyó una perspectiva teórica. Se establecieron las hipótesis y determinaron las variables, estableciendo un plan para probarlas, para finalmente analizar los resultados que permitan fundamentar la comprobación o refutación de una hipótesis previa.

3.2 Alcance.

La presente investigación tiene un alcance correlacional, este tipo de estudios tiene como finalidad conocer la relación o grado de asociación que exista entre dos o más conceptos, categorías o variables en una muestra o contexto en particular. Para evaluar el grado de asociación entre dos o más variables, en los estudios correlacionales primero se mide

cada una de éstas, y después se cuantifican, analizan y establecen las vinculaciones. Tales correlaciones se sustentan en las hipótesis.

3.3 Diseño de investigación.

La presente investigación adopta un diseño del tipo no experimental. En la investigación no experimental, el objeto de estudios se concentra en el análisis de leyes, teorías, conceptos y conocimientos de una temática específica, ubicada dentro de una disciplina de estudios. El propósito es examinar, bajo un enfoque de carácter científico, la vigencia, utilidad, universalidad, actualización, confiabilidad y todo aquello que permita determinar la correcta aplicabilidad científica de lo que se está estudiando, lo cual será de utilidad para las áreas de estudios donde se ubican esos conocimientos. Las cuales se nutren de información de primera y segunda mano de conocimientos, teorías, leyes y conceptos aportados por anteriores investigaciones, los cuales ya se han comprobado y están plenamente aceptados por la comunidad científica. (Muñoz, 2011)

3.4 Población y muestra.

3.4.1 Población.

La población sujeta de estudio estuvo constituida por edificaciones esenciales ubicadas en las zonas sísmicas 3 y 4 del Perú.

3.4.2 Muestra del estudio.

El tamaño de muestra se centra en la edificación esencial ubicada en la zona sísmica 3 del Perú destinada para el Hospital de Coracora, que se encuentra en el distrito de Coracora, provincia de Parinacochas del departamento de Ayacucho.

3.5 Hipótesis.

3.5.1 Hipótesis general.

Si se desarrolla el diseño de la estructura con criterios para la funcionalidad continua, se puede garantizar la protección de elementos estructurales así como también elementos no estructurales, garantizando su operatividad, sin ver afectadas sus capacidades de prestación de servicios.

3.5.2 Hipótesis específicas.

1. Si se realiza el análisis sísmico teniendo en cuenta que la estructura es convencional con base fija, podremos conocer el comportamiento estructural con las características convencionales y así poder determinar que si se satisfacen las condiciones para la funcionalidad continua.
2. Si realizamos un análisis sísmico a la estructura implementada con aisladores de base de péndulo triple de fricción FPT 8827/14-12/10-6, entonces podremos conocer el comportamiento de la estructura aislada y así poder determinar si se satisfacen las condiciones para la funcionalidad continua.
3. Al realizar un análisis de los resultados de distorsiones de entrepiso y aceleraciones de piso, comparando el comportamiento de los modelos de base convencional fija y base aislada, podemos determinar variaciones porcentuales superiores al 200 % de un modelo con respecto al otro.

3.6 Operacionalización de variables.

3.6.1 Variables.

Una variable es un factor, evento, situación o fenómeno que representa cierto interés dentro de la investigación y del cual se precisa conocer su intensidad o categoría. Se conoce como variable porque el factor estudiado “puede” obtener distintos valores, es decir, varía entre

una observación y otra. Existen básicamente dos variables que participan de todo proceso de investigación: Independientes, dependientes.

- **Variables Independientes.** Aquellas que se consideran las causas. Se identifica siempre una variable cuya magnitud o característica se relaciona con otra a la cual afecta. Las variables independientes objeto de estudio en la tesis son las Propiedades dinámicas obtenidas de un análisis sísmico de una edificación aislada con péndulo de fricción triple, Propiedades del aislador sísmico como el coeficiente de fricción, radios de curvatura del aislador.
- **Variables Dependientes.** Son aquellas que dependen de la acción (intensidad o característica) de la variable independiente. Las variables independientes para la presente tesis son, las fuerzas sísmicas, desplazamientos laterales, derivas o distorsiones de entrepiso.

3.6.2 Indicadores

Al referirnos a los conceptos indicamos que estos no son observables directamente. Por lo tanto, se deben buscar procedimientos que permitan la medición indirecta mediante manifestaciones externas, empíricas y observables. Tales manifestaciones o expresiones reciben el nombre de indicadores.

- **Indicador asociada a la variable Independiente.** El valor del periodo, la aceleración, coeficientes de fricción del aislador, Radio de curvatura.
- **Indicador asociada a la variable Dependiente.** Fuerzas Sísmicas, longitud de las deformaciones y desplazamientos.

En el cuadro 3.1 siguiente muestra en resumen, la relación entre las variables y los indicadores identificados en la presente investigación.

Cuadros 3.1: Variables e Indicadores del estudio

	Variables	Indicadores	Medición
Independientes	Propiedades dinámica	Valor del periodo (T)	s
		Valor de la aceleración (s)	m/s ²
	Propiedades del Aislador	Coefficiente de Fricción (μ)	μ
		Radio de Curvatura	m
Dependiente	Las fuerzas sísmicas.	Índice de fuerza.	kgf
	Las deformación	Longitud de las deformaciones.	m
	Desplaz. lateral de aislador.	Longitud de los desplazamientos.	m
	Las derivas de piso.	valor de deriva (Δ)	Δ

Adoptado de: *Elaboración propia.*

3.7 Técnicas e instrumentos.

Las técnicas constituyen el conjunto de mecanismos, medios o recursos dirigidos a recolectar, conservar, analizar y transmitir los datos de los fenómenos sobre los cuales se investiga. Por consiguiente, las técnicas son procedimientos o recursos fundamentales de recolección de información, de los que se vale el investigador para acercarse a los hechos y acceder a su conocimiento.

La investigación usa la técnica de análisis de contenido. Para llegar a los resultados se organizó una secuencia de actividades, que comprenden 3 partes, el primero es la recolección de información, el segundo realizar el análisis sísmicos para la estructura y finalmente la evaluación y análisis de resultados.

- **Parte 1.** Se realiza el estudio y análisis de la información, apoyandonos en artículos y publicaciones relacionadas al tema de investigación, como son:
 - Funcionalidad Continua.
 - Aisladores de base de Triple Péndulo de Fricción.
 - Normativa para el diseño de estructura Aislada.

- **Parte 2.** Dado que se implementó el conocimiento y se tiene claro las ideas, se procede con el modelamiento y análisis sísmico dinámico apoyado del sistema con base convencional fija y el sistema aislado, con el fin de obtener los resultados requeridos que marquen el cumplimiento del objetivo. Para este procedimiento nos apoyamos como herramienta en el programa ETABS.
- **Parte 3.** Una vez que se disponga de datos de los parámetros de análisis, procedemos a evaluar y seleccionar los resultados requeridos para poder realizar la contrastación de nuestra hipótesis.

3.8 Técnicas estadísticas para el procesamiento de la información.

La presente investigación se apoya en la técnica de estadística descriptiva, empleando medidas de dispersión máximo y mínimo, utilizando el sistema de distribución de frecuencia simple y la representación gráfica para el procesamiento de la información de los resultados del análisis.

La estadística descriptiva se entiende como el conjunto de métodos para procesar información en términos cuantitativos de tal forma que se les de un significado. La cual permite organizar y presentar un conjunto de datos de manera que describan en forma precisa las variables analizadas haciendo rápida su lectura e interpretación. Entre los sistemas para ordenar los datos se encuentran principalmente dos: a) la distribución de frecuencias y b) la representación gráfica. Estos sistemas de organización y descripción de los datos permiten realizar un análisis de datos, dependiendo de los objetivos y de la naturaleza de la investigación que se realiza. La distribución de frecuencias simple es una tabla que se construye con base en los siguientes datos: clase o variable (valores numéricos) en orden descendente o ascendente y tabulaciones. (Avila, 2006)

3.9 Desarrollo del trabajo de tesis.

Con el objetivo de desarrollar los Criterios de Diseño de Funcionalidad Continúa propuesta por Víctor Zayas. En el presente capítulo se desarrolla el análisis sísmico de una edificación esencial empleando los conceptos presentados en la sección 2.2.1, con lo cual se va a obtener

desplazamientos, aceleraciones de piso y derivas de entrepiso en el centro de masa de cada piso para ver si se cumple los parámetros de la funcionalidad continua. Para el desarrollo del análisis sísmico emplearemos como herramienta el software computacional ETABS V16¹; ejecutados para dos modelos de análisis, una estructura con aisladores sísmicos de Triple Péndulo de Fricción FPT 8827/14-12/10-6 y para una estructura convencional o con base fija. Para el análisis del sistema aislado se va a emplear el modelo de 5 fases propuesta en (Fenz & Constantinou, 2008b, 2008a), definida en la sección 2.3.8 de la presente tesis, para el aislador sísmico triple péndulo de fricción FPT. El análisis sísmico tanto para la estructura de base fija como para la estructura con aisladores de base, se realizara considerando el método de respuesta en el tiempo.

La presente aplicación se realiza cumpliendo la nueva norma (ASCE, 2016), los estándares para la funcionalidad continua propuesta en (Zayas, 2017), el Reglamento Nacional de Edificaciones y su Norma Técnica de Edificación (E030, 2018)². Usando un modelo de curva de histéresis que permite representar el comportamiento real de los aisladores, además, se incrementa el nivel de detalle en los cálculos.

3.9.1 Aplicación de la funcionalidad continua en una edificación esencial.

La edificación esencial pertenece al proyecto del Hospital de Coracora a la cual le corresponde la categoría II-1 de acuerdo a la norma técnica de salud (MINSA, 2011), esta ubicado en el distrito de Coracora provincia de Parinacochas del departamento de Ayacucho.

La cual se compone de una edificación de cinco pisos, además de un sótano (edificio principal). Conformada por pórticos de concreto armado que forman el sistema sismorresistente del edificio. Los techos serán de losa maciza, armadas en dos direcciones de 0.18m de peralte. Para el techo del último piso se consideró una cobertura metálica a dos aguas. Las columnas interiores en general serán de 0.70x0.70m y de 0.60x0.60m en los niveles

¹ETABS, Extended Three Dimensional Analysis of Building Systems, lo cual significa en español (Análisis Tridimensional Extendido de Edificaciones), el software ETABS tiene la capacidad de manejar desde la mas simple edificación como hasta la más compleja, gracias a su capacidad de calculo no lineal, haciendola una herramienta casi obligatoria para los ingenieros estructurales.

²“Diseño Sismorresistente” cuya modificación fue aprobada con Resolución Ministerial N°355-2018-VIVIENDA del 22 de octubre de 2018

superiores. Las vigas interiores y exteriores se han planteado con secciones de 0.40x0.60m y 0.40x0.80m respectivamente.

Para el diseño de la edificación se asume como base fija en el nivel de terreno ya que es considerado como el modelo más apropiado. (Toledo, 2015) Con lo cual se considerará que la cimentación permite modelar como empotrados los apoyos en la base de la estructura. Además se asumirá que las losas de concreto armado tienen la rigidez y resistencia suficiente para funcionar como diafragma rígido.

El hospital esta clasificado como edificación esencial según la Norma Técnica de Edificación (E030, 2018), para el diseño se usará el factor $R=1$ y la deriva del entrepiso no debe ser mayor al 0.3%, con una aceleración espectral de piso no mayor de 0.4g.

Los hospitales, según la Norma (E030, 2018), son considerados Estructuras Esenciales y se ubican en la Categoría A1, cuyo principio especificado en su numeral 1.3 busca asegurar que las edificaciones esenciales permanezcan en condiciones operativas luego de un sismo severo, por ende su función no debería interrumpirse inmediatamente después de ocurrido un sismo. Por ello estas estructuras deben necesariamente calificar como estructuras que a la acción de un sismo severo el daño sea no mayor del 2% del costo de remplazo. Estos requerimientos de la norma serán satisfechos realizando el diseño considerando estructuras con una rigidez que permita controlar las derivas de entrepiso no mayor al 3%, con coeficiente $R=1$ y con una aceleración espectral de piso no mayor de 0.4g; que son los principios de la funcionalidad continua.

A continuación se muestra la configuración en planta de la edificación.

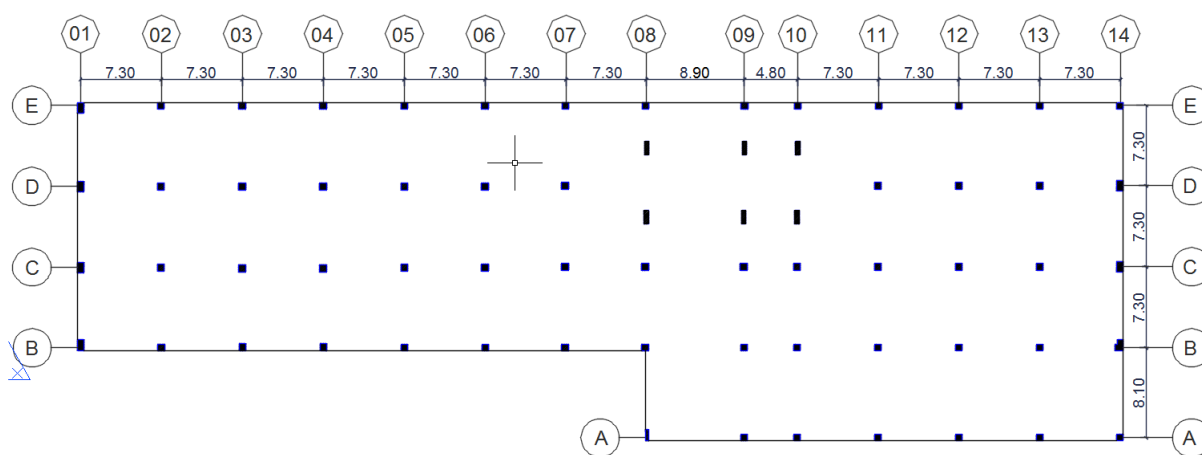


Figura 3.1: Configuración estructural piso 1

Adoptada de: GRA

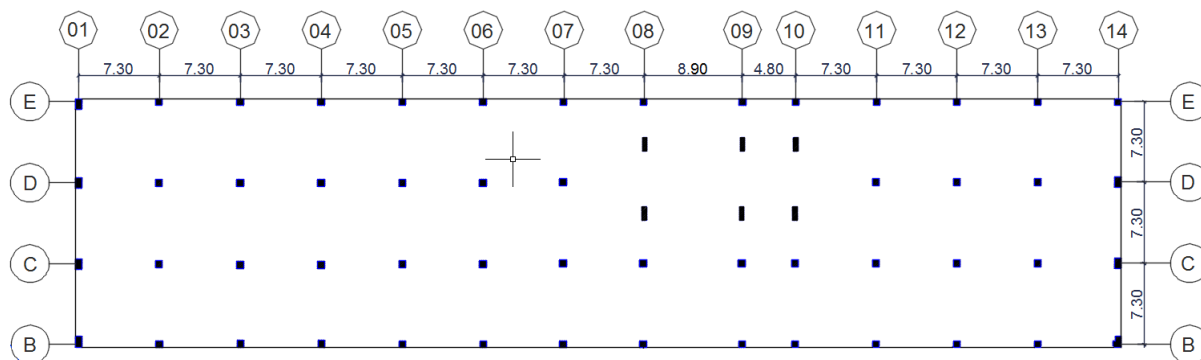


Figura 3.2: Configuración estructural piso 2

Adoptada de: GRA



Figura 3.3: Elevación general de la estructura

Adoptada de: GRA

3.9.2 Unidades Productoras de Servicios de Salud (UPSS)

Es la UPSS organizada para desarrollar funciones homogéneas y producir determinados servicios de salud, en relación directa con su nivel de complejidad. (MINSA, 2011)

- **Servicios finales:** UPSS Consulta Externa, UPSS Hospitalización.
- **Servicios intermedios:** UPSS Centro Obstétrico, UPSS Centro Quirúrgico, UPSS Diagnóstico por Imágenes, UPSS Patología Clínica, UPSS Anatomía Patológica,

UPSS Farmacia, UPSS Banco de Sangre, UPS Nutrición y Dietética, UPS Central de Esterilización, UPS Servicios Administrativos, UPS Servicios Generales, UPS Casa de fuerza, UPS Tratamiento de residuos sólidos, UPS Gestión de la información, Casa materna, Residencia médica.

3.9.3 Materiales y Elementos Estructurales

1. Propiedades de los Materiales

Se trabajara con el concreto armado para todos los elementos estructurales y estructuras metálicas para la cobertura del último piso, cuyas propiedades se muestran a continuación:

Cuadros 3.2: Propiedad de los Materiales

<u>Concreto Armado</u>		
Resistencia del Concreto	:	$f'_c = 210 \text{ Kg/cm}^2$
Peso Específico	:	$\gamma_m = 2400 \text{ Kg/m}^3$
Módulo de Elasticidad	:	$E_c = 217493,941 \text{ Kg/cm}^2$
Módulo de Corte	:	$G_c = 94562,583 \text{ Kg/cm}^2$
Módulo de Poisson	:	$\nu = 0,15$
Resistencia a Fluencia del Acero	:	$f_y = 4200 \text{ Kg/cm}^2$
<u>Acero para Estructura Metálica</u>		
Resistencia a Fluencia	:	$f_y = 4200 \text{ Kg/cm}^2$
Resistencia a Rotura	:	$f_u = 4080 \text{ Kg/cm}^2$

La propiedad de los materiales especificados se han tomado haciendo referencia el expediente técnico del proyecto de Hospital de Coracora.

2. Descripción Geométrica de los Elementos

Como dimensionamiento preliminar de la estructura en estudio, se utilizó un diseño realizado por los proyectistas. El cual se realizó de acuerdo al Reglamento Nacional de Edificaciones (*RNE, 2006*). Las secciones obtenidas para el análisis se muestran en el Cuadro 3.3.

Cuadros 3.3: Dimensión de los Elementos Estructurales del Edificio

Columnas	Sección	Vigas	Sección
C1	60x100	V1	40x60
C2	40x60	V2	40x80
C3	60x60	V3	40x75
C4	60x70	V4	30x60
C5	90x70	V5	50x75

3. Cargas para el análisis

Las cargas adoptadas del Reglamento Nacional de Edificaciones (*RNE, 2006*) y su Norma Técnica Complementarias par Cargas (*E020, 2006*) se muestra en el Cuadro 3.4

Cuadros 3.4: Cargas Muertas y Vivas

Descripción	Entrepiso	Azotea
Carga Muerta (kg/m ²)		
Losa Maciza e=18cm	432	-
Albañilería	210	-
Acabados	100	-
Cobertura Metálica	-	110
Total	742	110
Carga Viva (kg/m ²)		
Consultorios y Oficinas	300	-
Corredores y Escaleras	400	-
Azotea	-	100
Techo con Cobertura	-	30

3.9.4 Objetivos para el desempeño sísmico para la estructura.

El objetivo de diseño que establecemos va a determinar el comportamiento del sistema de aislación y de la edificación, a su vez el objetivo depende del uso, desempeño y características con el cual queremos que cuente la edificación. Por ejemplo para un uso esencial como un hospital, los objetivos de diseño deberán permitir el control de daño en elementos estructurales, no estructurales y contenido de la edificación.

Para la presente investigación optaremos por los parámetros establecidos en el “Estándar de Aislamiento Sísmico para la Funcionalidad Continua” (Zayas, 2017; V. A. Zayas, 2013). Estos parámetros tienen como objetivo de diseño, prevenir de manera confiable daños en la estructura, componentes no estructurales y contenidos, con lo cual se va a lograr niveles de desempeño sísmico avanzados. Estos parámetros establecen que:

- La probabilidad de ocurrencia del terremoto y la probabilidad de superación serán, para sismos con un 10% de probabilidad de ser superado en 50 años. (Período de retorno de 475 años)
- Para prevenir de manera confiable daños en la estructura, teniendo en cuenta los efectos de las imperfecciones de la construcción, irregularidades de la estructura, asimetrías, limitaciones y errores de diseño y modelado, consideramos un factor de reducción de fuerzas sísmicas de $R=1.0$
- Para evitar daños a componentes y contenidos no estructurales, que estén propensos a daño por desplazamientos estructurales laterales. Limitamos los desplazamientos laterales a un porcentaje de altura, deriva de entrepiso a 0.3%, como máximo.
- Para evitar daños a componentes y contenidos no estructurales que estén propensos a daño por aceleraciones de la estructura, velocidades y desplazamientos absolutos del piso consideramos que las aceleraciones medias espectrales de piso con 5% de amortiguamiento para el período comprendido entre 0 y 5 segundos, de los pisos ocupados, no excederán de 0.4g

3.9.5 Espectro de diseño y espectro máximo considerado MCER.

- **Espectro máximo considerado MCER:**

El espectro máximo considerado lo obtendremos de la norma (E030, 2018), considerando los siguientes parámetros:

- Factor de Zona (Z), la ciudad de Coracora se encuentra ubicada en la zona sísmica 3, por lo tanto según la Tabla N° 1 de la Norma E030-2018 le corresponde un valor de $Z=0.35$
- Parámetros del Sitio S , T_P y T_L . Según el estudio de mecánica de suelos se tiene un suelo intermedio S_2 , al cual le corresponde; $S = 1,15$, los periodos $T_P = 0,6$ y $T_L = 2,0$. Como se indica en las tablas N°3 y N°4 de la norma E030-2018
- Categoría de la Edificación U , según la Tabla N° 5 de la Norma E030-2018, la edificación esencial pertenece a la categoría “A” que le corresponde un factor de uso $U = 1,5$.
- Factor de Reducción (R), este valor se toma en base a consideraciones especiales, fijándose su valor tal como se indica en los parámetros de diseño para la funcionalidad continua $R = 1$.

La aceleración espectral está definida por la ecuación 3.1:

$$S_a = \frac{Z \cdot U \cdot C \cdot S}{R} \cdot g \quad (3.1)$$

- **Espectro de diseño DBE:**

La aceleración espectral para sismo de diseño, según la sección 11.4.7 del (ASCE, 2016) viene dada por la ecuación 3.2:

$$S_a = \frac{2}{3} \cdot S_{MCER} \quad (3.2)$$

Realizando los cálculos necesarios obtenemos los siguientes espectros:



ESPECTRO DE DISEÑO E030-2018 Y ESPECTRO MÁXIMO MCE

Región	: Ayacucho	$T < T_p$	$C = 2.5$	$Z = 0.35$
Provincia	: Parinacochas			$U = 1.5$
Distrito	: Coracora	$T_p < T < T_L$	$C = 2.5 \left(\frac{T_p}{T} \right)$	$S = 1.15$
Categoría	: A1			$TP = 0.6$
Zona	: Z3	$T > T_L$	$C = 2.5 \left(\frac{T_p T_L}{T^2} \right)$	$TL = 2$
Suelo	: S2			$R = 1$
				$g = 1$

$$S_a = \frac{Z \cdot U \cdot C \cdot S}{R} \cdot g \qquad S_a = \frac{2}{3} S_{MCE}$$

T	C	ZUCS/R	(2/3)ZUCS/R	T	C	ZUCS/R	(2/3)ZUCS/R
0	2.500	1.5094	1.0063	0.65	2.308	1.3933	0.9288
0.02	2.500	1.5094	1.0063	0.7	2.143	1.2938	0.8625
0.04	2.500	1.5094	1.0063	0.75	2.000	1.2075	0.8050
0.06	2.500	1.5094	1.0063	0.8	1.875	1.1320	0.7547
0.08	2.500	1.5094	1.0063	0.85	1.765	1.0654	0.7103
0.1	2.500	1.5094	1.0063	0.9	1.667	1.0063	0.6708
0.12	2.500	1.5094	1.0063	0.95	1.579	0.9533	0.6355
0.14	2.500	1.5094	1.0063	1	1.500	0.9056	0.6038
0.16	2.500	1.5094	1.0063	1.5	1.000	0.6038	0.4025
0.18	2.500	1.5094	1.0063	2	0.750	0.4528	0.3019
0.2	2.500	1.5094	1.0063	2.5	0.480	0.2898	0.1932
0.25	2.500	1.5094	1.0063	3	0.333	0.2013	0.1342
0.3	2.500	1.5094	1.0063	4	0.188	0.1132	0.0755
0.35	2.500	1.5094	1.0063	5	0.120	0.0725	0.0483
0.4	2.500	1.5094	1.0063	6	0.083	0.0503	0.0335
0.45	2.500	1.5094	1.0063	7	0.061	0.0370	0.0246
0.5	2.500	1.5094	1.0063	8	0.047	0.0283	0.0189
0.55	2.500	1.5094	1.0063	9	0.037	0.0224	0.0149
0.6	2.500	1.5094	1.0063	10	0.030	0.0181	0.0121

Figura 3.4: Cálculo de valores para el espectro de diseño y MCER

Adoptada de: Elaboración Propia

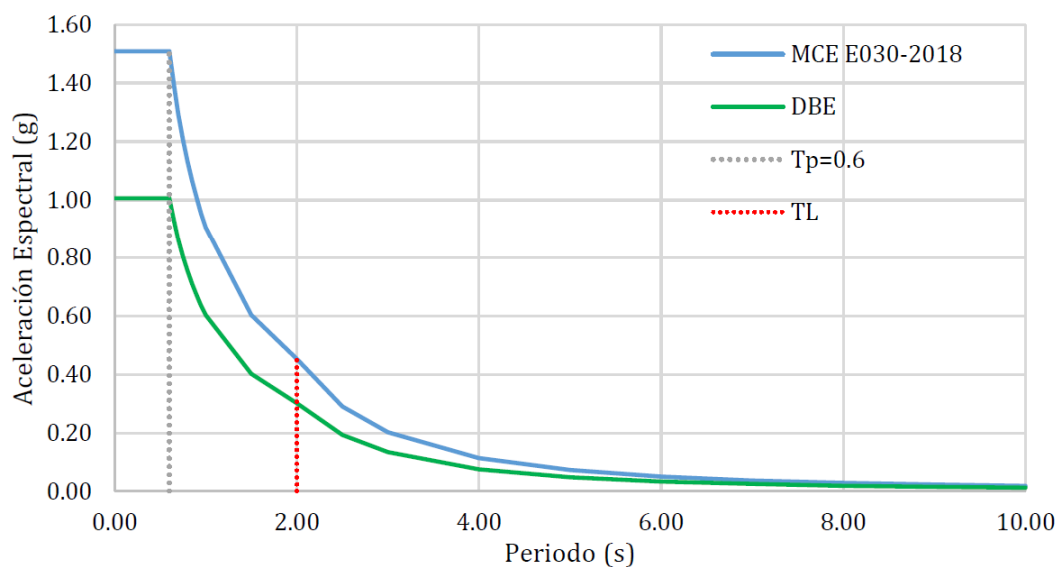


Figura 3.5: Espectro MCER y espectro de diseño

Adoptada de: Elaboración Propia

3.9.6 Acelerogramas seleccionados.

Seleccionamos siete pares de registros sísmicos teniendo como criterio, la selección de los sismos próximos a la zona de estudio en este caso los registros sísmicos de los acelerógrafos de Arequipa, además considerando algunos de los más relevantes de la historia sísmica del Perú cuyas estaciones se encuentran en Lima e Ica. Para esto acudimos a la base de datos de la red de acelerógrafos del CISMID³.

Se ha considerado un código para cada registro con la finalidad de identificarla para la presente tesis, en el cuadro 3.5 se presenta la información de los registros sísmicos seleccionados

Cuadros 3.5: Registros sísmicos seleccionados

Código	Estación	Sismo	Mw	Aceleración max.	
				EW	NS
PQR-1966	Parque de la Reserva, Lima	17 de octubre de 1966	8.1	-180.56	-268.24
PQR-1970	Parque de la Reserva, Lima	31 de mayo de 1970	6.6	-105.05	-97.81
ZAR-1974	Zárate, Lima	05 de enero de 1974	6.1	-138.94	-156.30
PQR-1974	Parque de la Reserva, Lima	03 de octubre de 1974	6.6	-194.21	180.09
UNSA-2001	UNSA, Arequipa	07 de julio de 2001	6.5	-123.21	-120.52
UNSA-2005	UNSA, Arequipa	13 de junio de 2005	7.2	-80.92	65.12
ICA-2007	Única, Ica	15 de agosto de 2007	7.9	-272.82	333.66

Adoptada de: Elaboración Propia

3.9.7 Espectros de respuesta elásticos.

En la figura 3.6 se encuentran los espectros obtenidos de cada acelerograma en la componente EO (Este-Oeste) y NS (Norte-Sur) para un factor de amortiguamiento del 5 %, cada registro previamente normalizada para 0.35g.

³Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres, es un Instituto de Investigación creado por la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Ingeniería.

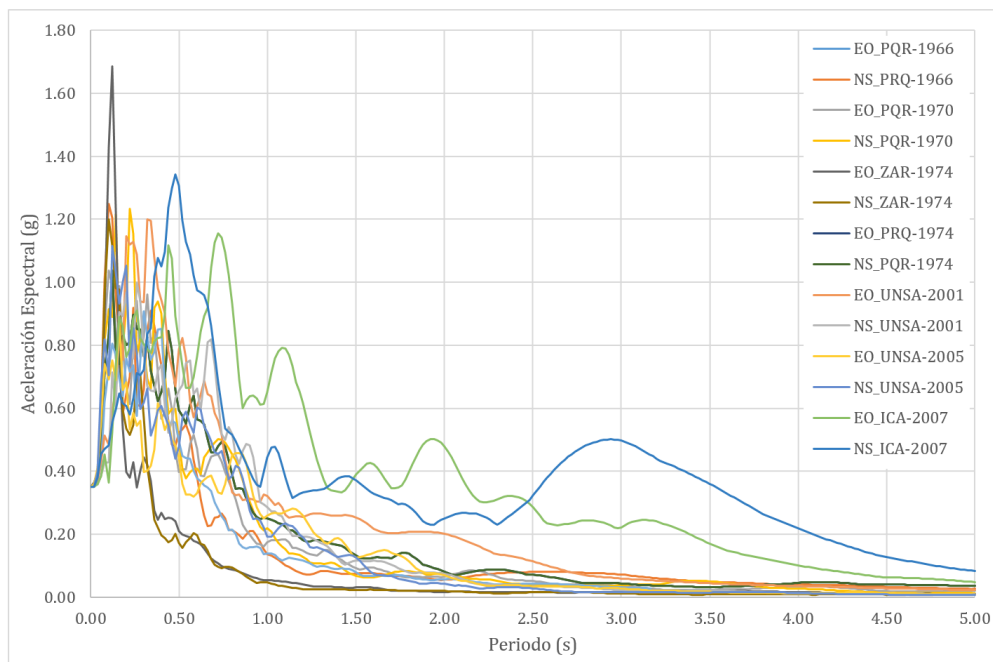


Figura 3.6: Espectro de aceleraciones de los pares seleccionados

Adoptada de: elaboración propia

Debemos obtener también el espectro SRSS para cada par de componentes como lo indica el ASCE 2016 en su sección 17.3.3. Con la finalidad de verificar la condición para el escalado de registros del ASCE 2016, estos se muestra en la figura 3.7.

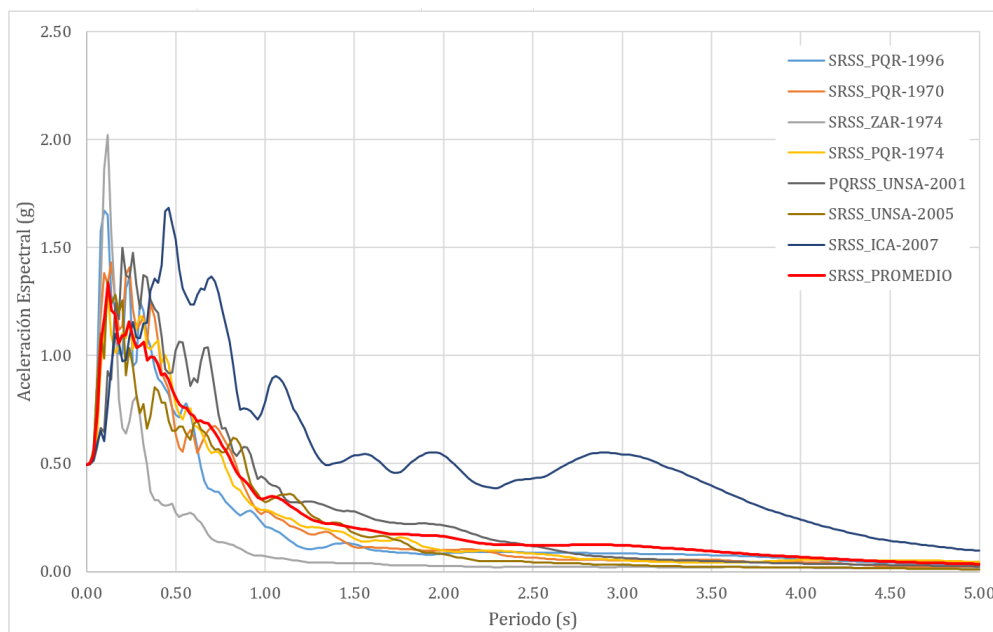


Figura 3.7: Espectro de Aceleraciones SRSS de los pares seleccionados

Adoptada de: elaboración propia

En la figura 3.8, al realizar la comparación de los espectros de diseño, MCER y Promedio SRSS, apreciamos que es necesario realizar un escalado hasta lograr que las ordenadas del espectro promedio SRSS estén por encima del espectro objetivo.

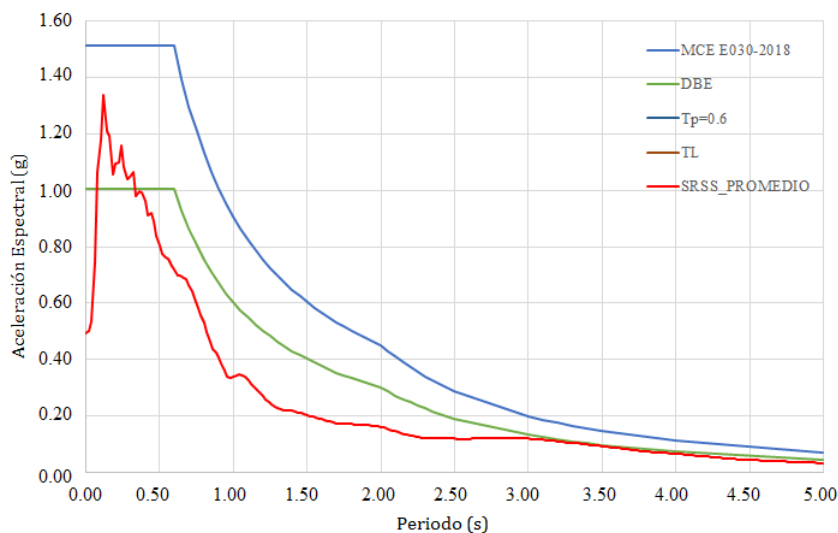


Figura 3.8: Espectro de diseño DBE, MCER y promedio SRSS

Adoptada de: elaboración propia

3.9.8 Escalado de los registros sísmicos.

Dentro de las diversas metodologías para realizar el escalado de los registros sísmicos para un espectro de diseño, emplearemos el software especializado SeismoMatch 2018 la cual es una aplicación capaz de ajustar acelerogramas de sismos para que coincida con un espectro de respuesta objetivo específico, utilizando el algoritmo de wavelets propuesto por Abrahamson en 1992 y Hancock et al. en el 2006. (*Seismosoft, 2018*)

Según lo recomendado por el ASCE 2016 el escalado se realiza en un rango de periodos entre $0,75TM$ a $1,25TM$. Pero como aun no contamos con las propiedades del sistema de aislación y con la finalidad de considerar un rango de periodos amplios, definimos un rango de periodos entre 0.05 a 5.0 seg. A continuación mostramos de manera breve el escalado para el componente EO (Este-Oeste) del sismo PQR-1966, la cual se realizara de manera análoga para los 7 pares de registros seleccionados.

1. Procedemos importando la componente EO de nuestro registro sísmico PQR-1966 al programa Seismomatch que se encuentran en unidades Gal (cm/s^2), como se muestra en la figura 3.9.

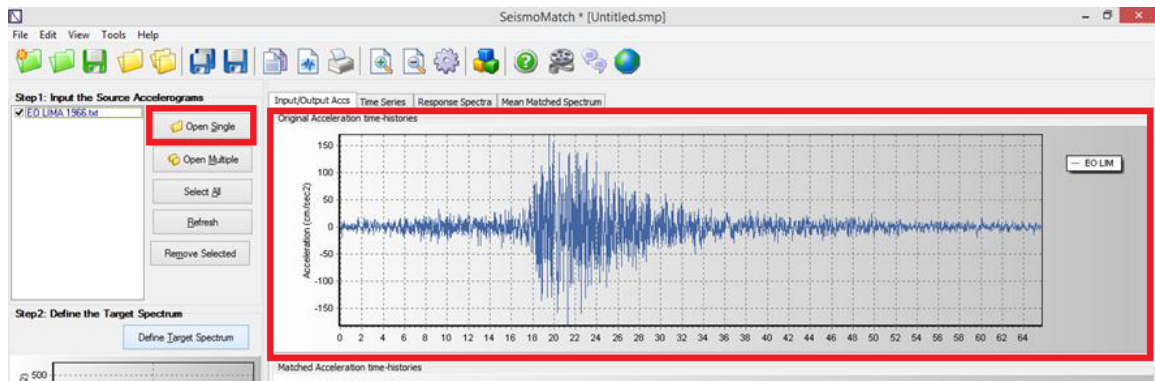


Figura 3.9: Importación del registro a escalar en el SeismoMatch

Adoptada de: elaboración propia

- Una vez tengamos nuestra componente correctamente importada, procedemos a definir nuestro espectro objetivo o de diseño, en la pestaña “Define the Target Spectrum”. Y procedemos a configurar el periodo mínimo y máximo que se considera para escalar la componente. Luego presionamos la pestaña “Do Matching” para iniciar el escalado de los valores de la componente ingresada, este procedimiento se muestra en la figura 3.10.

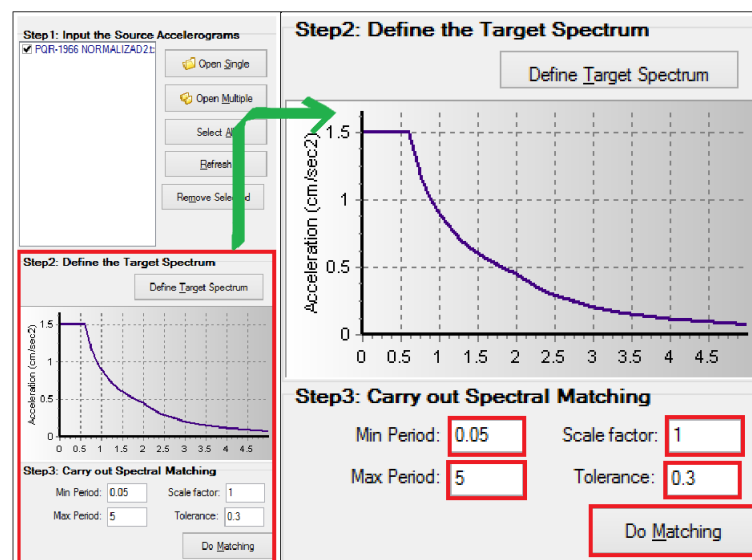


Figura 3.10: Espectro objetivo y parámetros de escala

Adoptada de: elaboración propia

- Finalmente el programa ha realizado el escalado del registro ingresado el cual podemos exportar los datos necesarios escalados, este procedimiento se muestra en la figura 3.11.

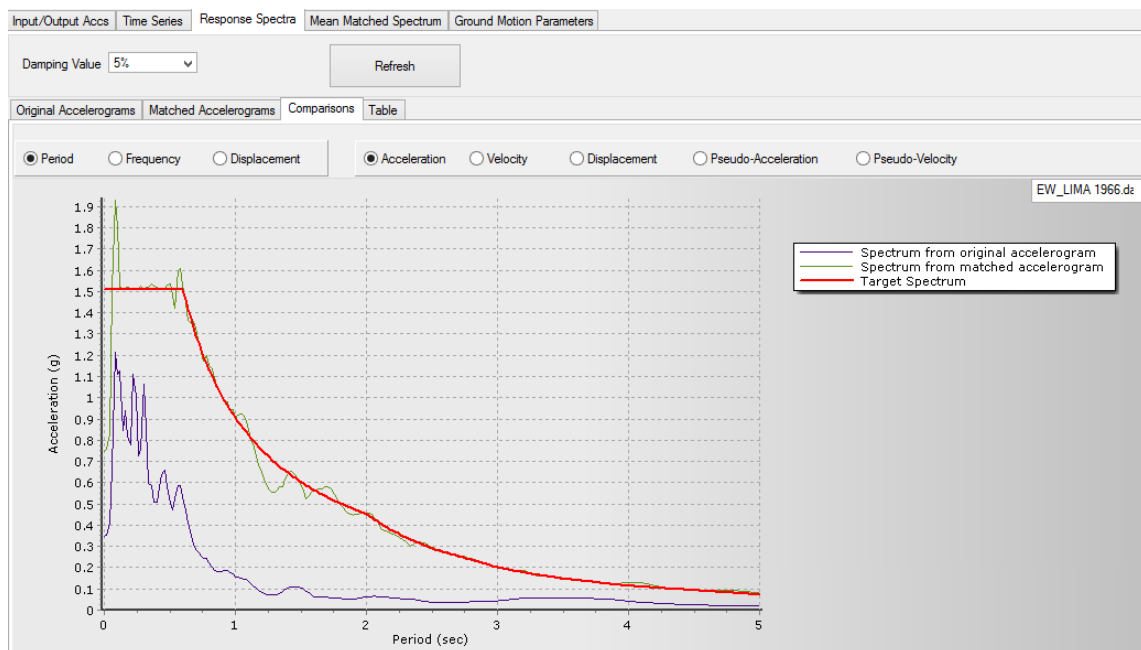


Figura 3.11: Resultado y comparación del componente escalado

Adoptada de: elaboración propia

A. Escalado para el sismo MCER

En la figura 3.12 se muestra el espectro promedio SRSS sobre el espectro objetivo que en este caso es el espectro máximo considerado MCER

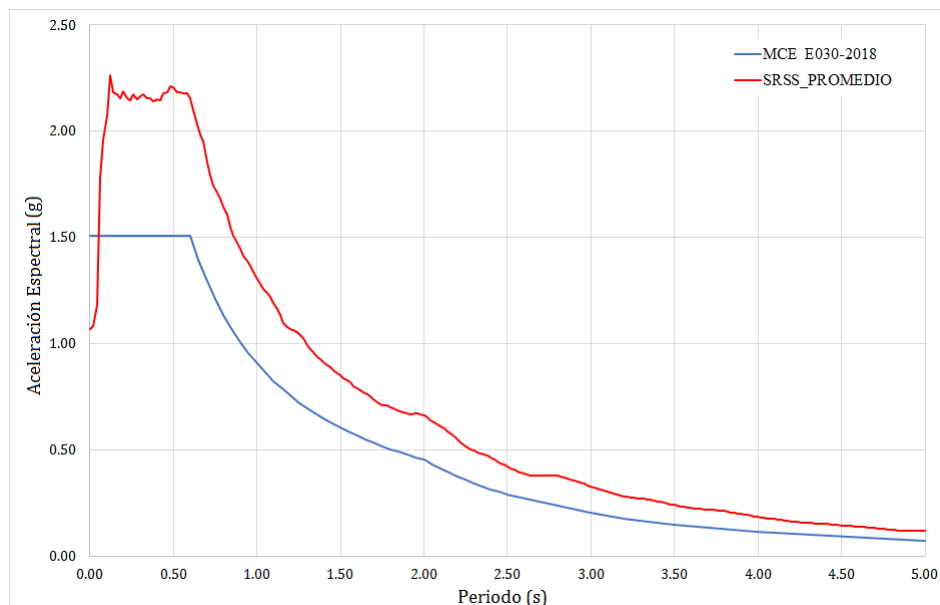


Figura 3.12: Espectro de aceleraciones SRSS escalado al espectro MCER

Adoptada de: elaboración propia

Estos datos obtenidos del escalado de los pares de registros seleccionados, cumplen con lo especificado en la sección 17.3.3 del (*ASCE, 2016*). Los mismos que emplearemos para el análisis de respuesta en el tiempo de la edificación, el cual trataremos en las secciones posteriores.

3.9.9 Propiedades del aislador para el caso de estudio.

Para el hospital de Coracora consideramos que el aislador obtenido en un diseño preliminar es el dispuesto por EPS (Earthquake Protection System) el cual tiene las siguientes características.

- **Propiedades Geométricas**

Denominación estándar: $FPT8827/14-12/10-6 \approx FPT R_o D_c / D_S - R_i / D_R - h_R$

Donde:

R_o : Radio de curvatura de las superficies externas ($R_1 = R_4$)

D_c : Diámetro de las superficies cóncavas externas.

D_S : Diámetro del aislador interno.

R_i : Radio de curvatura de las superficies internas ($R_2 = R_3$).

D_R : Diámetro del deslizador rígido.

h_R : Altura del deslizador rígido $2h_2 = 2h_3$

De la definición desarrollada en la sección 2.3.12.1, obtenemos las propiedades que brinda la denominación estandar del aislador:

$$\begin{array}{lll} R_o = 88'' & D_C = 27'' & D_S = 14'' \\ R_i = 12'' & D_R = 10'' & h_R = 6'' \end{array}$$

Esto corresponde a:

$$\begin{array}{lll} R_1 = R_4 = 88'' & h_1 = h_4 = \frac{8''}{2} = 4'' & d_1 = d_4 = \frac{D_C - D_S}{2} = 6,5'' \\ R_2 = R_3 = 12'' & h_2 = h_3 = \frac{h_R}{2} = 3'' & d_2 = d_3 = \frac{D_S - D_R - 2t_{r2}}{2} = 1,5'' \end{array}$$

Se considera que $t_{r2} = 0,5''$

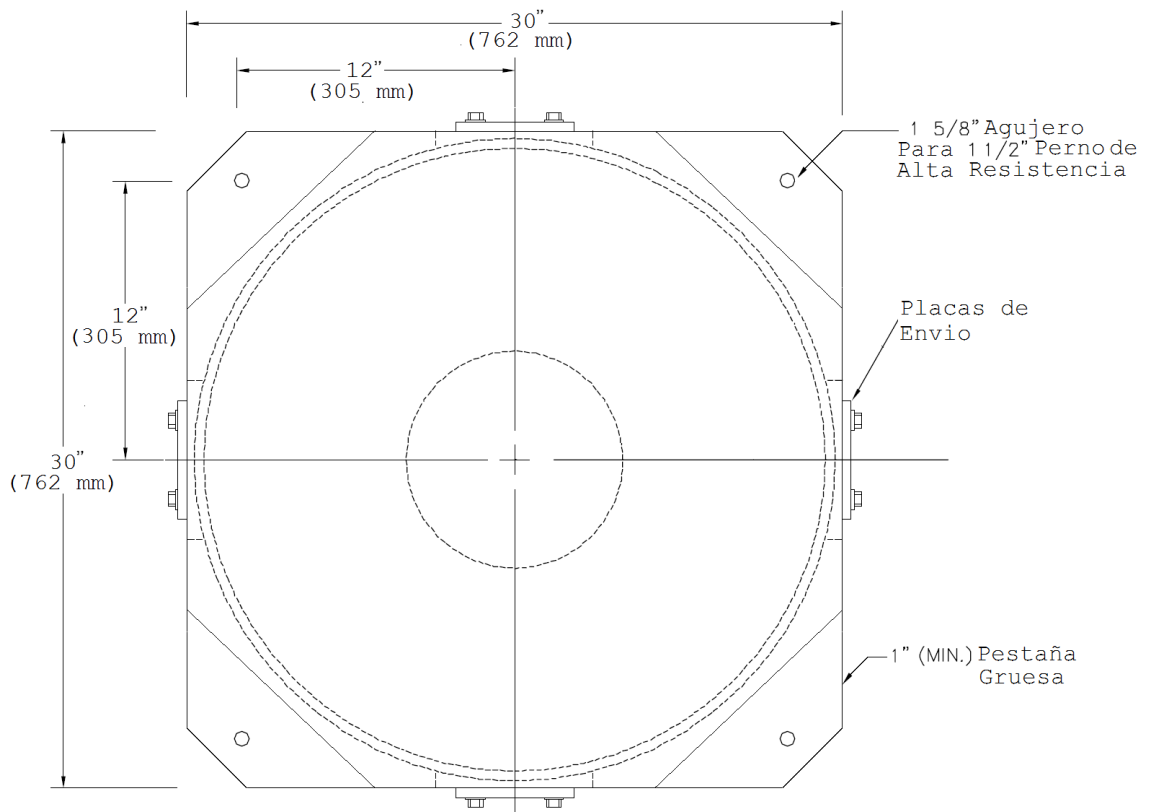


Figura 3.13: Vista en planta del aislador FPT

Adoptada de: Earhtquake Protection Systems

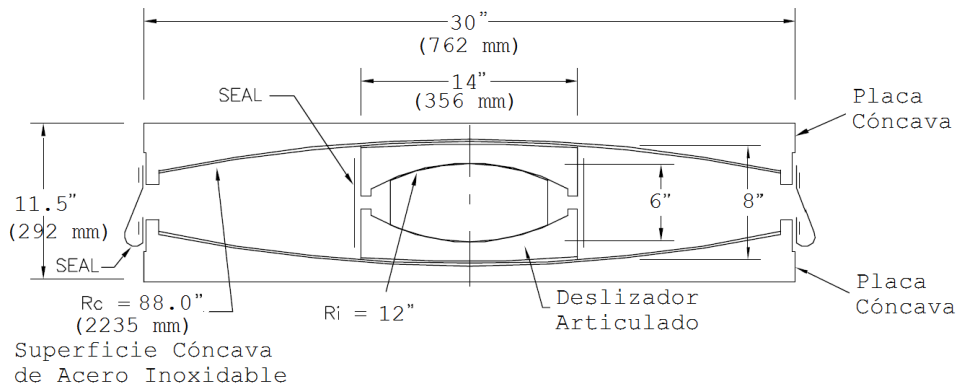


Figura 3.14: Sección transversal del aislador FPT

Adoptada de: Earhtquake Protection Systems

- **Propiedades Mecánicas de Fricción**

Las propiedades mecánicas de coeficientes de fricción están definidas para Upper Bound (límite superior), Lower Bound (Limite Inferior) y nominal como se muestra en el cuadro 3.6:

Cuadros 3.6: Propiedades de Fricción del aislador FPT

Tipo	μ_1	$\mu_2 = \mu_3$	μ_4
Upper Bound	0.06	0.02	0.08
Nominal	0.04	0.01	0.07
Lower Bound	0.03	0.005	0.06

Adoptada de: Elaboración Propia

- **Propiedades Adicionales**

$$W = 13556,40 \text{ Ton} \quad g = 9,81 \text{ m/s}^2 = 386,4 \text{ in/s}^2$$

$$W_S = 11297 \text{ Ton} \quad S_{M1} = 0,6708 \text{ g}$$

- **Capacidad de Desplazamiento**

$$d_1^* = d_4^* = \frac{d_1(R_1 - h_1)}{R_1} = 6,205 \text{ in}$$

$$d_2^* = d_3^* = \frac{d_2(R_2 - h_2)}{R_2} = 1,125 \text{ in}$$

$$D_t = d_1^* + d_2^* + d_3^* + d_4^* = 14,66 \text{ in} = 372,36 \text{ mm}$$

Con estas propiedades definidas procedemos a realizar los cálculos correspondientes.

3.9.10 Análisis de Fuerza Lateral Equivalente.

3.9.10.1 Cálculo del desplazamiento máximo D_M .

Para este proceso es necesario asumir un valor inicial D_M , que esté dentro del límite del desplazamiento de la Fase III del movimiento del aislador de Triple Péndulo de Fricción.

- Asumiendo un valor similar al propuesto por EPS:

$$D_M = 10,5'' (266,70 \text{ mm})$$

- Verificamos que este valor se encuentre dentro de la Fase III

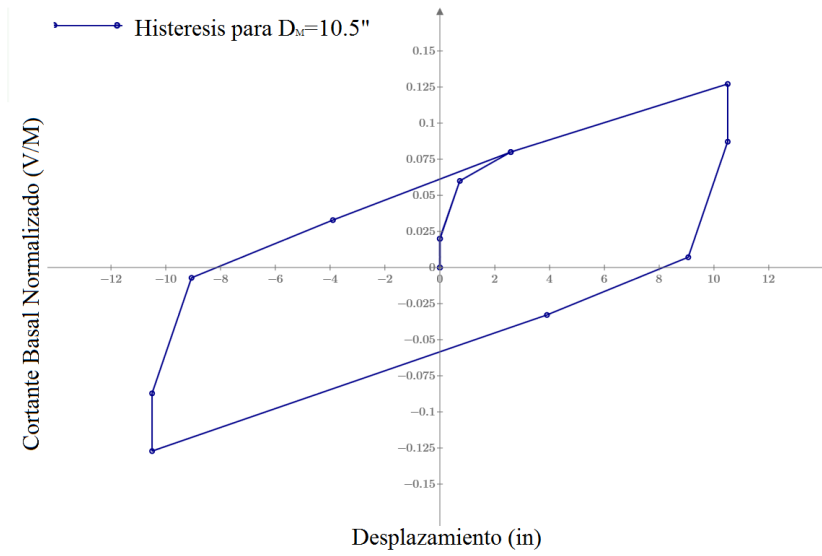


Figura 3.15: Diagrama de Histeresis Fase III para $u=10.5$ in

Adoptada de: Elaboración Propia

Los límites de desplazamientos obtenidos para las fases II, III y IV se muestran en las ecuaciones 3.3, 3.4 y 3.5:

$$u^{**} = u^* + (\mu_4 - \mu_1) (R_{eff1} + R_{eff3}) = 2,58 \text{ in } (65,532 \text{ mm}) \quad (3.3)$$

$$u_{dr1} = u^{**} + d_1 \left(1 + \frac{R_{eff4}}{R_{eff1}} \right) - (\mu_4 - \mu_1) (R_{eff1} + R_{eff4}) = 11,629 \text{ in } (295,377 \text{ mm}) \quad (3.4)$$

$$u_{dr4} = u_{dr1} + \left(\left(\frac{d_4}{R_{eff4}} + \mu_4 \right) - \left(\frac{d_1}{R_{eff1}} + \mu_1 \right) \right) (R_{eff2} + R_{eff4}) = 13,489 \text{ in } (342,621 \text{ mm}) \quad (3.5)$$

- Cálculo de la Cortante V_M , este valor lo obtenemos de la ecuacion de la fuerza en la fase III, para un desplazamiento de 10.5.^{el} cual asumimos.

$$V_M = 0,1271 \cdot W$$

- Cálculo de la rigidez efectiva K_M

$$K_M = \frac{V_M}{D_M} = 0,0121 \cdot W/in$$

- Cálculo del periodo efectivo T_M

$$T_M = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{W}{K_M \cdot g}} = 2,906 \text{ seg}$$



- Cálculo del amortiguamiento efectivo β_M

Para poder determinar el amortiguamiento efectivo, es necesario obtener la energía disipada, la cual se obtiene apartir del área que encierra el ciclo de histeresis.

$$E_M = 2,3349 \cdot W$$

$$\beta_M = \frac{E_M}{2 \cdot \pi \cdot K_M \cdot D_M^2} = 0,278$$

- Cálculo del factor de reducción del amortiguamiento, B_M

$$B_M = \left(\frac{\beta_M}{0,05} \right)^{0,3} = 1,674$$

- Cálculo del desplazamiento máximo D_M

$$D_M = \frac{g \cdot S_{M1} \cdot T_M}{4 \cdot \pi^2 \cdot B_M} = 11,392 \text{ in } (289,357 \text{ mm})$$

- Verificación para un error de 0.2

$$11,392 - 10,5 > 0,2 \rightarrow \text{Error}$$

De la desigualdad vemos que el error es mayor al asumido, entonces realizamos los calculos nuevamente hasta conseguir el error deseado o menos, el cual cumple para los siguientes valores:

$$\begin{aligned} D_M &= 11,60 \text{ in } (294,64 \text{ mm}) & V_M &= 0,1337 \cdot W \\ K_M &= 0,01174 \cdot W & T_M &= 2,957 \text{ seg} \\ E_M &= 2,6051 \cdot W & \beta_M &= \frac{E_M}{2 \cdot \pi \cdot K_M \cdot D_M^2} = 0,263 \\ B_M &= \left(\frac{\beta_M}{0,05} \right)^{0,3} = 1,645 & D_M &= 11,776 \text{ in } (299,11 \text{ mm}) \end{aligned}$$

$$11,775 - 11,60 < 0,2 \rightarrow \text{Aceptable}$$

Estos valores fueron calculados para propiedades “Upper Bound” (Limite Superior), se realiza un calculo similar para propiedades “Lower Bound” (Limite Inferior).

- Cálculo del desplazamiento máximo para propiedades Lower Bound:

$$\begin{aligned} D_M &= 13,39 \text{ in } (340,106 \text{ mm}) & V_M &= 0,1338 \cdot W \\ K_M &= 0,0099 \cdot W & T_M &= 2,906 \text{ seg} \\ E_M &= 1,726 \cdot W & \beta_M &= \frac{E_M}{2 \cdot \pi \cdot K_M \cdot D_M^2} = 0,153 \\ B_M &= \left(\frac{\beta_M}{0,05} \right)^{0,3} = 1,40 & D_M &= 13,625 \text{ in } (346,075 \text{ mm}) \end{aligned}$$

En la figura 3.16, podemos apreciar el comportamiento de histéresis para propiedades Upper Bound.

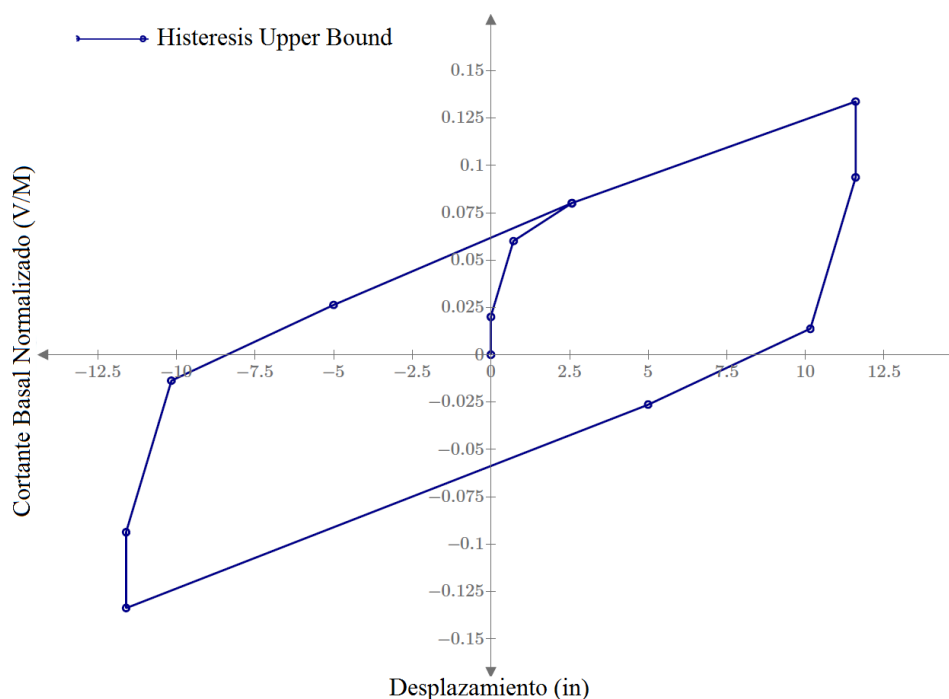


Figura 3.16: Diagrama de histéresis de la fase III

Adoptada de: Elaboración Propia

El resumen de los cálculos desarrollados se muestra en el cuadro 3.7:

Cuadros 3.7: Resumen de cálculos para el Método Estático Equivalente

	Propiedad	unidad	Upper Bound	Lower Bound
V_M	Cortante Basal	W	0.1337	0.1338
K_M	Rigidez Efectiva	W/in	0.01174	0.0099
T_M	Periodo Efectivo	$seg.$	2.957	2.906
E_M	Energía Disipada	$W \cdot in$	2.6051	1.726
β_M	Amortig. Efectivo	%	26.3	15.3
B_M	Coeficiente de Amortig.	-	1.645	1.40
D_M	Desplazamiento Máximo	in	11.60	13.39
		mm	294.64	340.106

Adoptada de: Elaboración Propia

3.9.10.2 Desplazamiento total máximo y cortante basal de diseño

- **Desplazamiento Máximo y Desplazamiento Total Máximo D_{TM}**

- Desplazamiento Máximo

$$D_M = 11,60 \text{ in } (294,64 \text{ mm})$$

- Desplazamiento Total Máximo

$$D_{TM} = 1,5 \cdot D_M = 17,40 \text{ in}$$

- **Fuerzas Cortantes V_b y V_s**

- V_b , cortante Basal para el sistema de aislación y los elementos estructurales bajo el nivel de la base.

Cuadros 3.8: Fuerza Cortante V_b

V_b	Upper Bound	Lower Bound
$V_b = K_M \cdot D_M$	$0,1337 \cdot W$	$0,1338 \cdot W$
	1812,49 Ton	1813,85 Ton

Adoptada de:Elaboración Propia

- V_s , Cortante Basal para elementos estructurales que se encuentran por encima del nivel de la base, donde R_I es el coeficiente de reducción $1 < R_I = 3R/8 < 2$, para nuestro caso asumimos 1.5.

Cuadros 3.9: Fuerza Cortante V_s

V_s	Upper Bound	Lower Bound
$V_{st} = V_b \left(\frac{W_S}{W} \right)^{1-2,5 \cdot \beta_M}$	$0,1256 \cdot W$	$0,1196 \cdot W$
	1702,42 Ton	1620,97 Ton
$V_s = \frac{V_{st}}{R_I}$	$0,0837 \cdot W$	$0,0797 \cdot W$
	1134,95 Ton	1080,65 Ton

Adoptada de: Elaboración Propia

- Los límites establecidos en el ASCE7-16 para V_s , se muestran en el cuadro 3.10, cuyos cálculos se detallan en el anexo A.2 de la presente tesis.

Cuadros 3.10: Límites establecidos para V_s

Descripción	Valor
1. Fuerza lateral para la estructura empotrada asociado a una carga W_S y un periodo igual al de la estructura aislada T_{M_UB}	$V_s = 0,075 \cdot W_S$ (852,547 Ton)
3. Fuerza lateral V_{st} , para V_b requerida para activar el sistema de aislamiento completamente para propiedades Upper Bound	$V_s = 0,076 \cdot W$ (1026,063 Ton)
3a. 1.5 las propiedades del sistema de aislamiento	$V_s = 0,083 \cdot W$ (1118,403 Ton)

Adoptada de: Elaboración Propia

En resumen, teniendo en cuenta estas consideraciones mínimas, establecemos que para el diseño de los elementos estructurales por debajo del sistema de aislamiento serán diseñadas para $V_b = 0,1338 \cdot W = 1813,85 \text{ Ton}$, mientras que los elementos estructurales por encima del sistema de aislamiento se diseñaran para $V_s = 0,0837 \cdot W = 1134,95 \text{ Ton}$.

3.9.11 Análisis de respuesta en el tiempo.

El análisis de respuesta en el tiempo la desarrollaremos en el software de análisis y diseño estructural especializado ETABS, en el cual los aisladores de triple péndulo de fricción se modelan como elementos tipo Link/Support "Triple Pendulum Isolator", para esto requerimos del cálculo de las propiedades del aislador de Triple péndulo.

3.9.12 Propiedades del elemento tipo Link/Support ETABS V16.

Desarrollamos cada una de las propiedades que requiere el elemento tipo link, para esto nos apoyaremos en la bibliografía de (*El-Bayoumi, 2015*)

Consideramos, que la superficie de contacto tiene un diametro igual al del deslizador rígido que se encuentra dentro del aislador al cual denominamos D_a , el aislador tiene una altura total h_T , ademas asumimos un módulo de elasticidad E_a la altura total.



$$D_a = 10'' \cdot 0,0254 = 0,254 \text{ m}$$

$$h_T = 11,5'' \cdot 0,0254 = 0,292 \text{ m}$$

$$E_a = 2,1 \cdot 10^7 \text{ ton/m}^2$$

3.9.12.1 Propiedades principales.

- **Área de la sección transversal**

$$A_a = \frac{\pi \cdot D_a^2}{4} = 0,0507 \text{ m}^2$$

- **Fuerza en el desplazamiento cero dividida por la carga normal**

$$\mu = \mu_1 - \left((\mu_1 - \mu_2) \cdot \frac{R_{2eff}}{R_{1eff}} \right) = 0,074$$

- **Inercia Rotacional (Rotational Inertia)**

$$K_{eff} = \frac{W_i}{R_{1eff}} + \frac{\mu \cdot W_i}{D_M} = 53,733 \text{ ton/m}$$

$$I = \frac{K_{eff} \cdot h_T^3}{12 \cdot E_a} = 5,314 \cdot 10^{-9} \text{ m}^4$$

- **Masa del Aislador**

Para el cálculo de la masa del aislador se sigue la siguiente secuencia de cálculos:

$$D_p = 2 \cdot D_M = 0,589 \text{ m}$$

$$W_a = \frac{1}{2,2046} \left(0,241 \cdot (3,2808 \cdot D_p)^2 - 0,0564 \cdot (3,2808 \cdot D_p) \right) = 0,359 \text{ ton}$$

$$M_a = \frac{W_a}{g} = 0,0366 \text{ ton} \cdot \text{seg}^2/\text{m}$$

En la figura se aprecia la curva que relaciona el diametro del deslizador rígido con el peso del aislador.

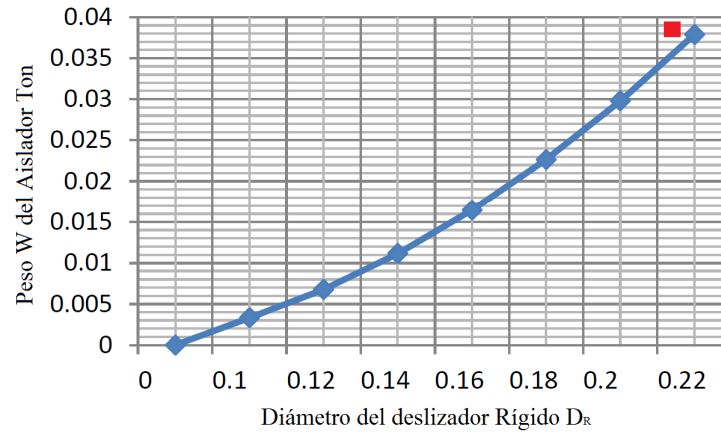


Figura 3.17: Masa del Aislador Vs Diametro del deslizador rígido

Adoptada de: (El-Bayoumi, 2015)

3.9.12.2 Propiedades direccionales U1.

- Rigidez Efectiva (effective stiffness)

$$R_E = \frac{A_a \cdot E_a}{h_T} = 3642881,568 \text{ ton/m}$$

- Amortiguamiento Efectivo (effective stiffness)

$$\beta_E = 26,3\%$$

3.9.12.3 Propiedades direccionales U2 y U3.

A. Determinación de las propiedades lineales

- Rigidez Efectiva (effective stiffness): 53,733 ton/m
- Amortiguamiento Efectivo (effective damping): 26,3 %
- Altura para la superficie exterior (Height for outer surface)

$$h_1 = h_4 = 0,102 \text{ m}$$

- Altura para la superficie interior (Height for inn surface)

$$h_2 = h_3 = 0,076 \text{ m}$$

B. Determinación de las propiedades no lineales

- Desplazamiento de Fluencia



$$D_Y = (\mu_4 - \mu_4) \cdot R_{1eff} \cdot 0,0254 = 0,01372 \text{ m}$$

- **Rigidez de la superficie exterior superior (stiffness of outer surface)**

$$\frac{\mu_4 \cdot W_i}{D_Y} = 1198,017 \text{ ton/m}$$

- **Rigidez de la superficie exterior inferior (stiffness of outer surface)**

$$\frac{\mu_1 \cdot W_i}{D_Y} = 898,513 \text{ ton/m}$$

- **Rigidez de la superficie interior (stiffness of inner surface)**

$$\frac{\mu_2 \cdot W_i}{D_Y} = 299,504 \text{ ton/m}$$

- **Coefficiente de Fricción Lento (Friction co. Slaw)**

- Superficie exterior superior: $\mu_4 = 0,08$
- Superficie exterior inferior: $\mu_1 = 0,06$
- Superficie interior: $\mu_2 = 0,02$

- **Coefficiente de Fricción Rápido (Friction co. Fast)**

- Superficie exterior superior: $2 \cdot \mu_4 = 0,16$
- Superficie exterior inferior: $2 \cdot \mu_1 = 0,12$
- Superficie interior: $2 \cdot \mu_2 = 0,04$

- **Parámetro de Velocidad (Rate Parameter), Friction co. Slaw / Friction co. Fast : 0,5**

- **Radio de la Superficie Deslizante**

- Superficie exterior superior: $R_{Aeff}(0,0254) = 2,134 \text{ m}$
- Superficie exterior inferior: $R_{1eff}(0,0254) = 2,134 \text{ m}$
- Superficie interior: $R_{2eff}(0,0254) = 0,229 \text{ m}$

- **Distancia de Parada (Stop Distance)**

- Superficie exterior superior: $2 \cdot D_Y + 2 \cdot d_1^*(0,0254) = 0,343 \text{ m}$
- Superficie exterior inferior: $2 \cdot D_Y + 2 \cdot d_1^*(0,0254) = 0,343 \text{ m}$
- Superficie interior: $2 \cdot D_Y = 0,02743 \text{ m}$

Los cálculos mostrados se realizaron para propiedades límite superior (Upper Bound) del aislador, se desarrolla de manera similar para propiedades límite inferior (Lower Bound). Los mismos que se muestran de manera detallada en el anexo A.3.

A continuación se muestra un resumen de las propiedades determinadas para límite superior y límite inferior, además de la manera en como ingresar los datos al ETABS V.16.2.2, como elemento tipo Link.

Cuadros 3.11: Propiedades Principales

Propiedad	unidad	Upper Bound	Lower Bound
Masa	$Ton \cdot seg^2/m$	0.0366	0.0366
Inercia Rotacional	m^4	$5,314 \cdot 10^{-9}$	$3,495 \cdot 10^{-9}$

Adoptada de: Elaboración Propia

Cuadros 3.12: Propiedades Direccionales U1

Propiedad	unidad	Upper Bound	Lower Bound
Rigidez Efectiva	Ton/m	3642881.568	3642881.568
Amortiguamiento Efectivo	%	26.30	15.30

Adoptada de: Elaboración Propia

Cuadros 3.13: Propiedades Lineales Direccionales U2 y U3

Propiedad	unidad	Upper Bound	Lower Bound
Rigidez Efectiva	Ton/m	53.733	35.122
Amortiguamiento Efectivo	%	26.30	15.30
Altura Superficie Exterior	m	0.102	0.102
Altura Superficie Interior	m	0.076	0.076

Adoptada de: Elaboración Propia

Cuadros 3.14: Propiedades No Lineales Direccionales U2 y U3, Upper Bound

Propiedad	Superficie		
	Exterior Superior	Exterior Inferior	Interior
Rigidez	1198.017	898.513	299.504
μ , lento	0.08	0.06	0.02
μ , rápido	0.16	0.12	0.04
Parámetro de Velocidad	0.5	0.5	0.5
Radio de Superficie	2.134	2.134	0.229
Distancia de parada	0.343	0.343	0.0274

Adoptada de: Elaboración Propia

Cuadros 3.15: Propiedades No Lineales Direccionales U2 y U3, Lower Bound

Propiedad	Superficie		
	Exterior Superior	Exterior Inferior	Interior
Rigidez	980.196	490.098	81.683
μ , lento	0.06	0.03	0.005
μ , rápido	0.12	0.06	0.01
Parámetro de Velocidad	0.5	0.5	0.5
Radio de Superficie	2.134	2.134	0.229
Distancia de parada	0.340	0.340	0.0252

Adoptada de: Elaboración Propia

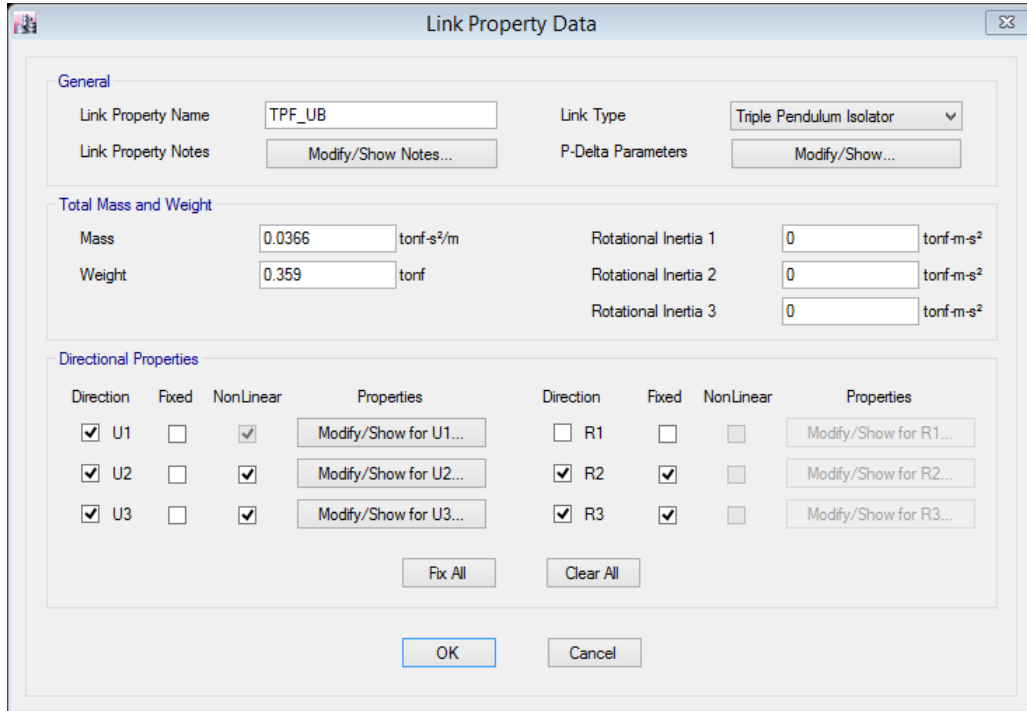
Para poder crear un elemento Link/Support en ETABS V16, nos ubicamos en la ventana principal y seguimos las siguientes pestañas:

Assign - Link/Support - Link/Support Properties

Definimos y creamos un nuevo elemento tipo Link/Support como se muestra en la figura 3.18, en el que procedemos a ingresar las propiedades principales en la siguiente secuencia.

- Figura 3.18, se muestra el ingreso de las propiedades principales del cuadro 3.11.
- Figura 3.19, se muestra el ingreso de las propiedades direccionales U1 del cuadro 3.12.

- Figura 3.20, se muestra el ingreso de las propiedades direccionales lineales y no lineales de U2 y U3 de los cuadros 3.13 y 3.14.



Direction	Fixed	NonLinear	Properties	Direction	Fixed	NonLinear	Properties
<input checked="" type="checkbox"/> U1	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Modify/Show for U1...	<input type="checkbox"/> R1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Modify/Show for R1...
<input checked="" type="checkbox"/> U2	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Modify/Show for U2...	<input checked="" type="checkbox"/> R2	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Modify/Show for R2...
<input checked="" type="checkbox"/> U3	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Modify/Show for U3...	<input checked="" type="checkbox"/> R3	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Modify/Show for R3...

Figura 3.18: Ingreso de Propiedades Principales

Adoptada de:Elaboración propia

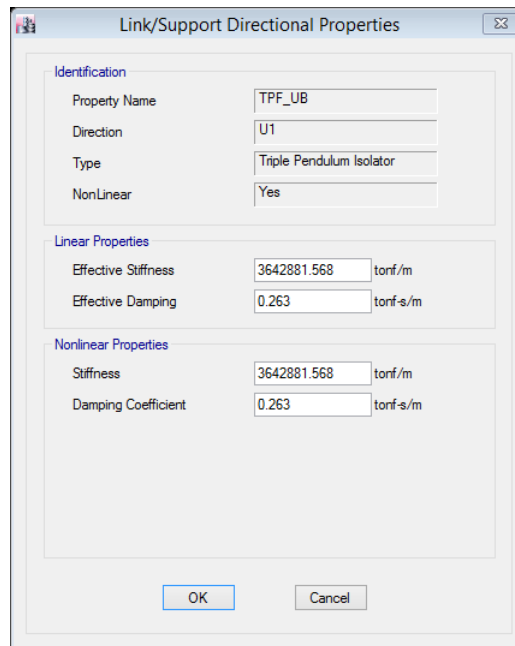
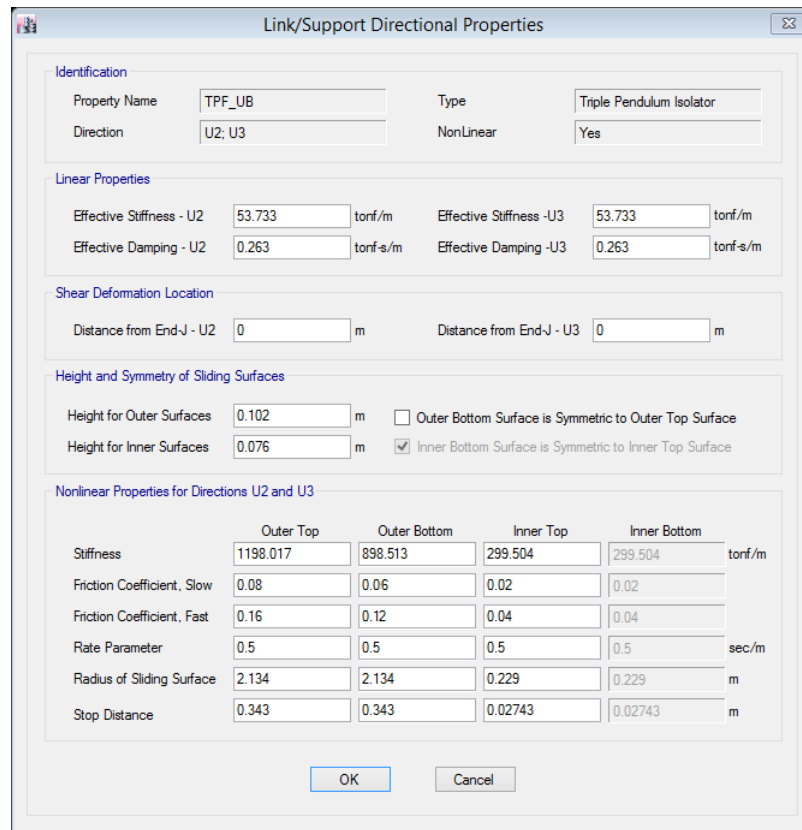


Figura 3.19: Ingreso de Propiedades Direccionales U1

Adoptada de:Elaboración propia



The dialog box is titled "Link/Support Directional Properties" and contains the following sections:

- Identification:** Property Name: TPF_UB, Type: Triple Pendulum Isolator, Direction: U2, U3, NonLinear: Yes.
- Linear Properties:** Effective Stiffness - U2: 53.733 tonf/m, Effective Stiffness - U3: 53.733 tonf/m, Effective Damping - U2: 0.263 tonf-s/m, Effective Damping - U3: 0.263 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: 0.102 m, Height for Inner Surfaces: 0.076 m. Checkboxes: "Outer Bottom Surface is Symmetric to Outer Top Surface" (unchecked), "Inner Bottom Surface is Symmetric to Inner Top Surface" (checked).
- Nonlinear Properties for Directions U2 and U3:** A table with columns for Outer Top, Outer Bottom, Inner Top, and Inner Bottom, and rows for Stiffness, Friction Coefficient (Slow and Fast), Rate Parameter, Radius of Sliding Surface, and Stop Distance.

	Outer Top	Outer Bottom	Inner Top	Inner Bottom	
Stiffness	1198.017	898.513	299.504	299.504	tonf/m
Friction Coefficient, Slow	0.08	0.06	0.02	0.02	
Friction Coefficient, Fast	0.16	0.12	0.04	0.04	
Rate Parameter	0.5	0.5	0.5	0.5	sec/m
Radius of Sliding Surface	2.134	2.134	0.229	0.229	m
Stop Distance	0.343	0.343	0.02743	0.02743	m

Figura 3.20: Ingreso de Propiedades lineales y no lineales para U2 y U3

Adoptada de:Elaboración propia

3.9.13 Consideraciones del análisis sísmico de respuesta en el tiempo.

1. Para realizar el análisis sísmico para base fija y base aislada se considerará los registros sísmicos escalados definidas en la sección 3.9.8.
2. Por cada registro sísmico que se aplique en el Análisis de Respuesta en el Tiempo, deberán analizarse dos casos por separado, el Caso 1, cuando la Componente Este-Oeste del registro sísmico actúa sobre la Dirección X-X de la estructura mientras que sobre la Dirección Y-Y lo hace la Componente Norte-Sur y el Caso 2, donde la Componente Norte-Sur del registro sísmico actúa sobre la Dirección X-X mientras que sobre la Dirección Y-Y lo hace la Componente Este-Oeste.
3. Para el Análisis Sísmico de Respuesta en el Tiempo para base fija o empotrada consideraremos un análisis lineal.
4. Para el Análisis de Base Aislada:

- a. Consideramos que la estructura tiene comportamiento elástico mientras se tiene un comportamiento no lineal únicamente en los aisladores de base de Triple Péndulo de Fricción.
- b. Además de las componentes importadas se definirá una función tipo rampa, debido a que los aisladores que usamos son péndulos de fricción y su comportamiento es controlado por fuerzas de fricción lo que significa que, los aisladores deben ser cargados con la carga vertical antes de que inicie el movimiento sísmico. Por eso es necesario definir la carga usando un historial de tiempo, por eso empleamos una función que incremente lentamente la carga en combinación con un alto amortiguamiento para aproximar una carga estática. Con esto logramos que la carga se aplique de manera dinámica.
- c. Las combinaciones de sismo para el análisis en base aislada se configura para que se aplique luego de que el peso vertical de la estructura se haya cargado dinámicamente en el aislador.
- d. En este caso optaremos por un análisis de Respuesta en el Tiempo del tipo No Lineal.

En la Figura 3.21 se presenta la vista en 3D del modelamiento del hospital de Coracora.

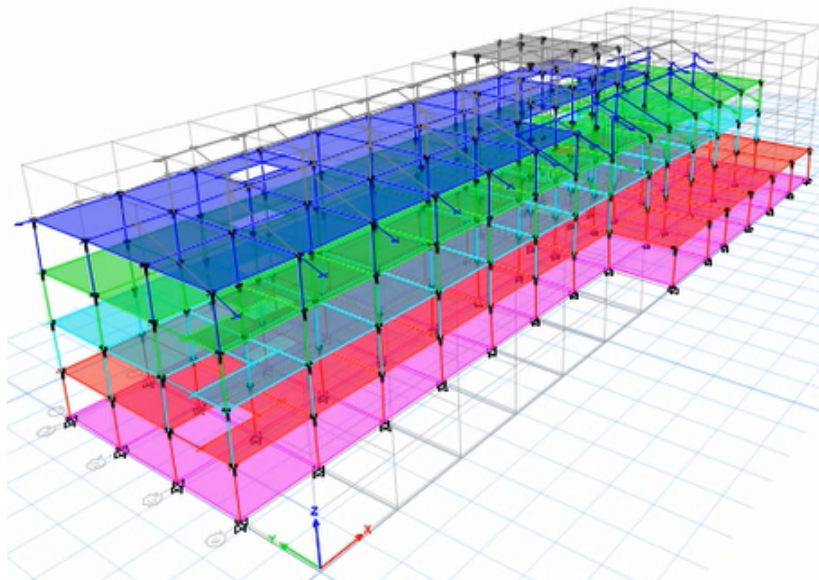


Figura 3.21: Modelo Geométrico Final

Adoptada de:Elaboración propia

3.9.14 Modelamiento geométrico

En esta sección mostramos un breve resumen del modelado de la edificación en estudio del Hospital de Coracora, para su respectivo análisis.

1. Luego de definir las grillas en el eje x, y, z, a partir de la geometría de la edificación. Definimos las propiedades de los materiales que componen la estructura, concreto armado y acero A36 cuyas propiedades fueron definidas en la sección 3.9.3, como se muestra en la figura 3.22

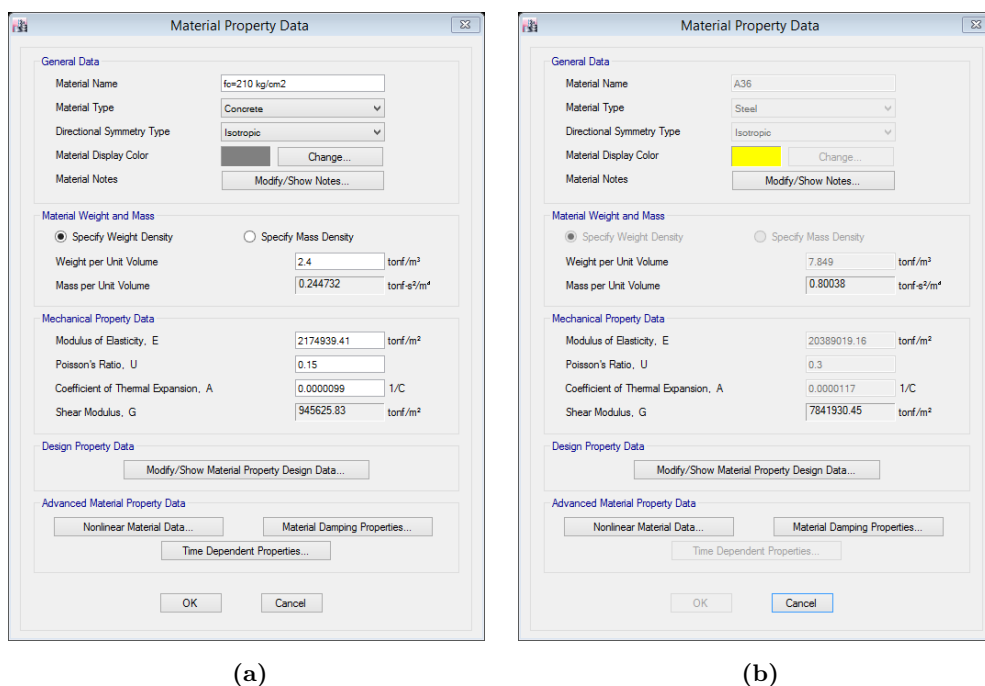


Figura 3.22: Propiedades de Materiales para el Diseño

Adoptada de:Elaboración Propia

2. Definimos las secciones con las que contamos para la estructura, vigas, columnas. Además definimos también el elemento tipo losa que para nuestro caso es una losa rígida de 18 cm.

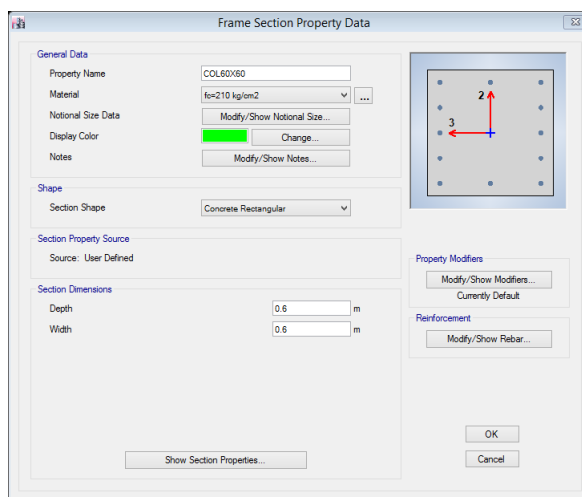


Figura 3.23: Sección Columna Definida

Adoptada de:Elaboración propia

3. Luego de definir las propiedades y secciones, modelamos la estructura dibujando todos los elementos que la componen.

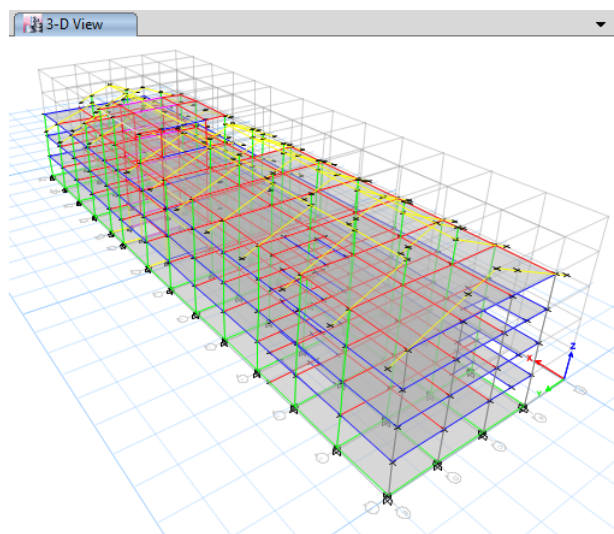


Figura 3.24: Modelado de la edificación

Adoptada de:Elaboración propia

4. Definimos los patrones de carga los cuales vamos a utilizar para asignar cargas en las losas, carga muerta, carga viva y carga viva de techo. Estas cargas la asignamos de acuerdo a las características definidas en la sección 3.9.3

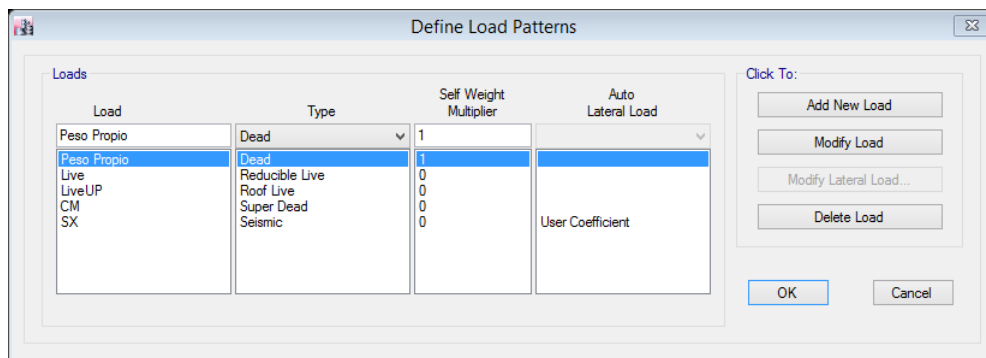


Figura 3.25: Patrones de Carga establecidos

Adoptada de:Elaboración propia

5. Definimos los patrones de carga para el metrado total, el cual especifica la norma (E030, 2018) en su ítem 4.3.

$$P = (\text{Peso Propio} + \text{Carga Muerta}) + 0,5CV + 0,25CVT$$

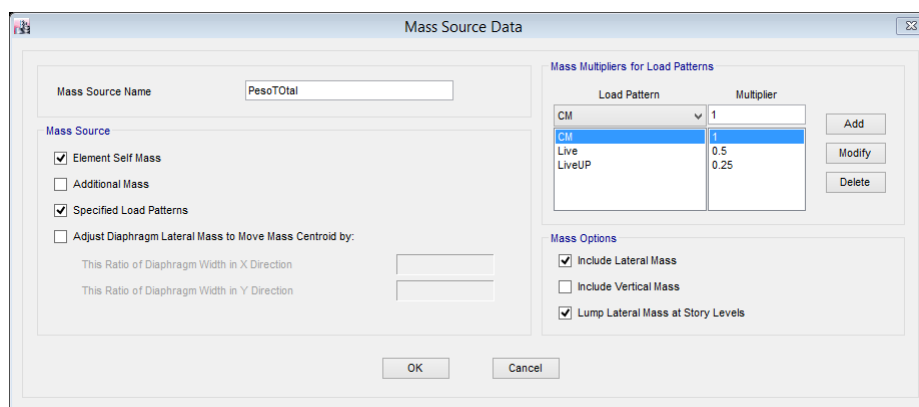


Figura 3.26: Configuración para el Metrado de Cargas

Adoptada de:Elaboración propia

6. Finalmente asignamos el diafragma rígido en cada una de las losas. Hasta aquí hemos conseguido el modelo básico para la estructura sobre la cual desarrollaremos el análisis sísmico de respuesta en el tiempo para la estructura convencional con base rígida y estructura aislada.

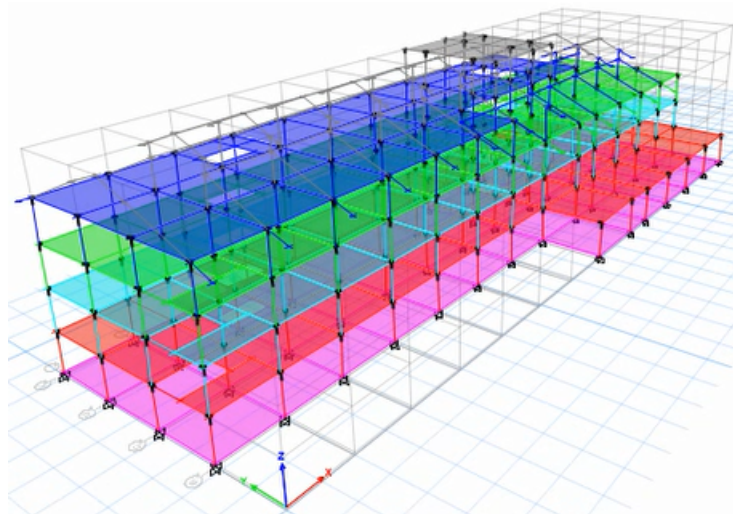


Figura 3.27: Modelo Geométrico Final

Adoptada de:Elaboración propia

3.9.15 Análisis lineal de respuesta en el tiempo base fija.

Para la estructura con base fija realizaremos un análisis dinámico de respuesta en el tiempo para el cual requerimos las siguientes configuraciones en el Software ETABS:

1. En el modelo geométrico desarrollado asignamos el empotramiento correspondiente e importamos las componentes Este-Oeste (EO) y de manera similar para la componente Norte-Sur(NS) de los registros sísmicos previamente normalizados y escalados.

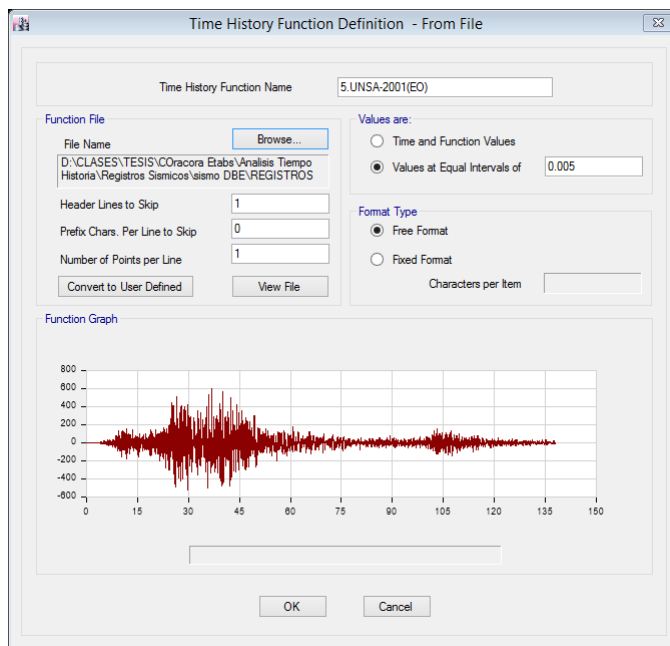


Figura 3.28: Importación de la componente EO al ETABS

Adoptada de:Elaboración propia

2. Con estas componentes creamos los casos de análisis y las combinaciones correspondientes como se muestra:

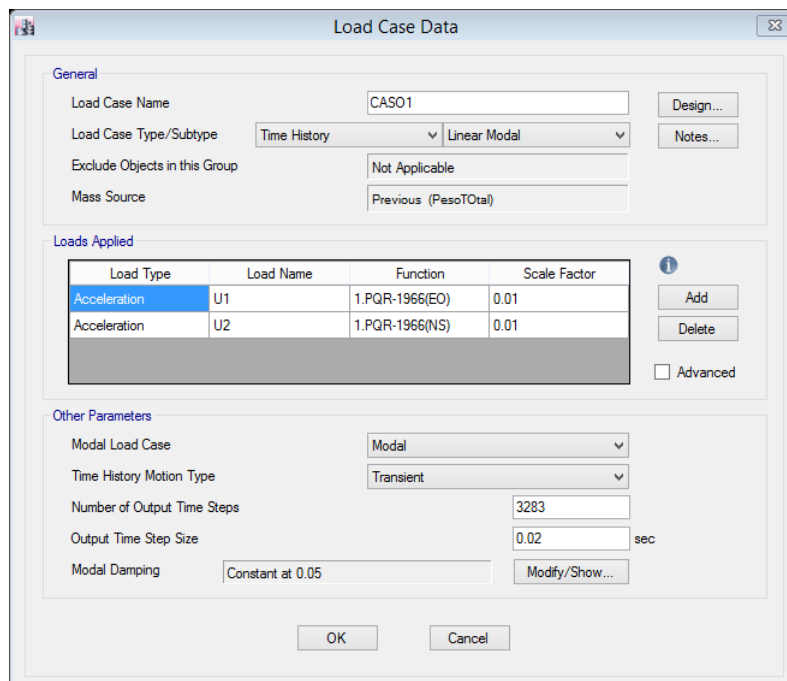
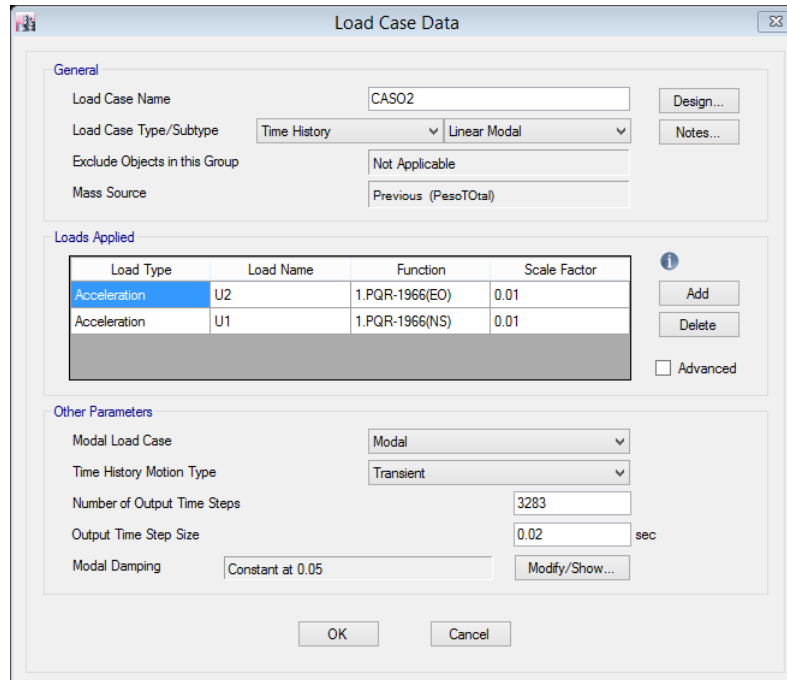


Figura 3.29: Caso de Análisis 1

Adoptada de:Elaboración propia



Load Type	Load Name	Function	Scale Factor
Acceleration	U2	1.PQR-1966(E0)	0.01
Acceleration	U1	1.PQR-1966(NS)	0.01

Figura 3.30: Caso de Análisis 2

Adoptada de:Elaboración propia

3. Finalmente ejecutamos el programa y verificamos los resultados para cada caso de análisis

3.9.16 Análisis no lineal de respuesta en el tiempo base aislada.

1. Al igual que para el análisis de la estructura con base empotrada, importamos las componentes del registro sísmico, además añadiremos una función tipo rampa para simular el comportamiento dinámico de carga de la estructura, cuya configuración se muestra en la figura 3.31

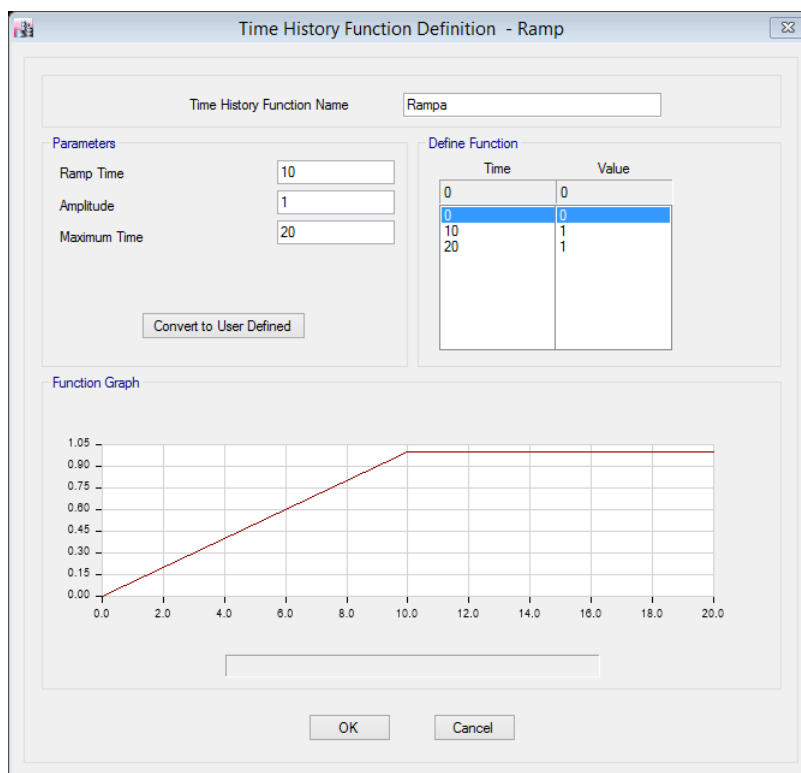


Figura 3.31: Configuración de la Función Tipo Rampa

Adoptada de:Elaboración propia

2. Definimos los casos de carga, dead, Caso 1 y Caso 2. Realizamos la configuración en el caso "dead" al que asignaremos la función tipo rampa, con la finalidad de que la carga se aplique de forma dinámica en lugar de estáticamente, para el cual usamos la siguiente configuración.

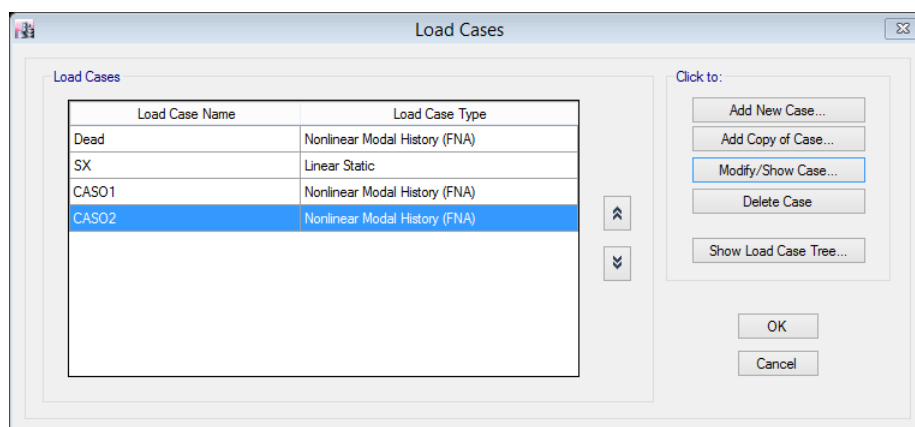


Figura 3.32: Casos de Carga para el Análisis Sísmico Aislado

Adoptada de:Elaboración propia

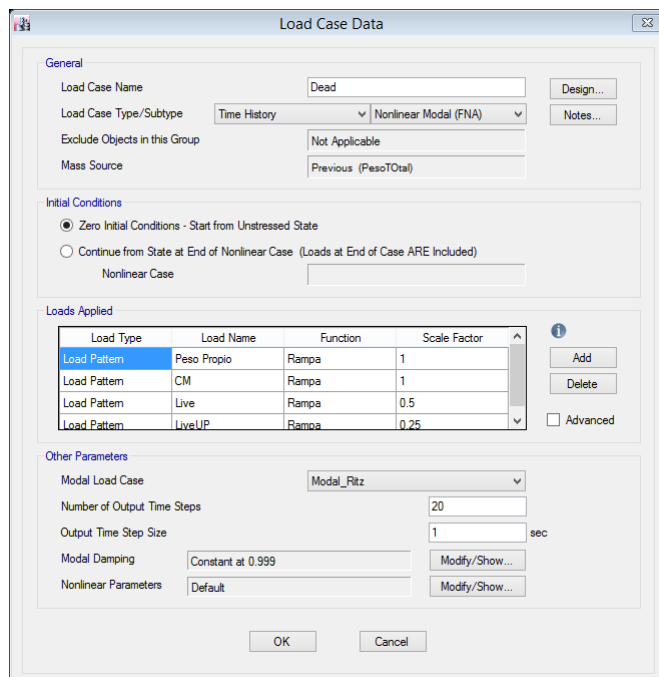


Figura 3.33: Configuración de la Función Tipo Rampa

Adoptada de:Elaboración propia

3. Configuramos el caso de análisis 1 y 2

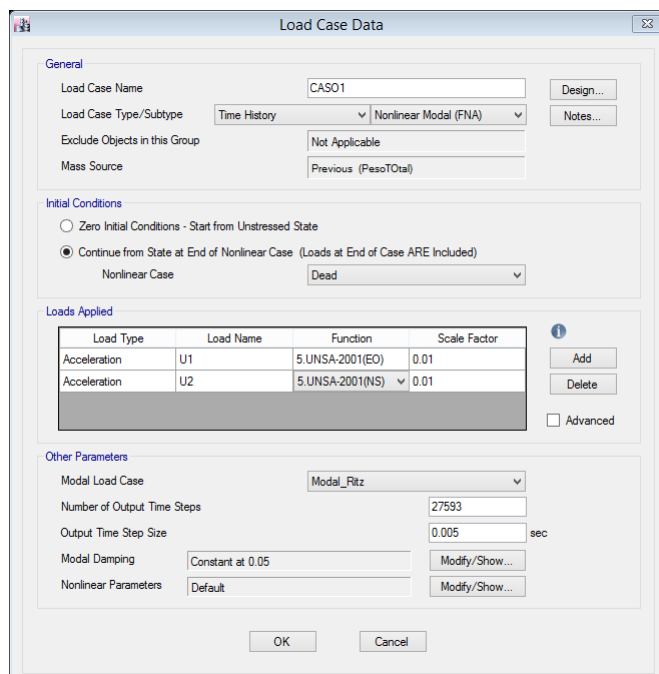


Figura 3.34: Configuración Caso 1 de Análisis

Adoptada de:Elaboración propia

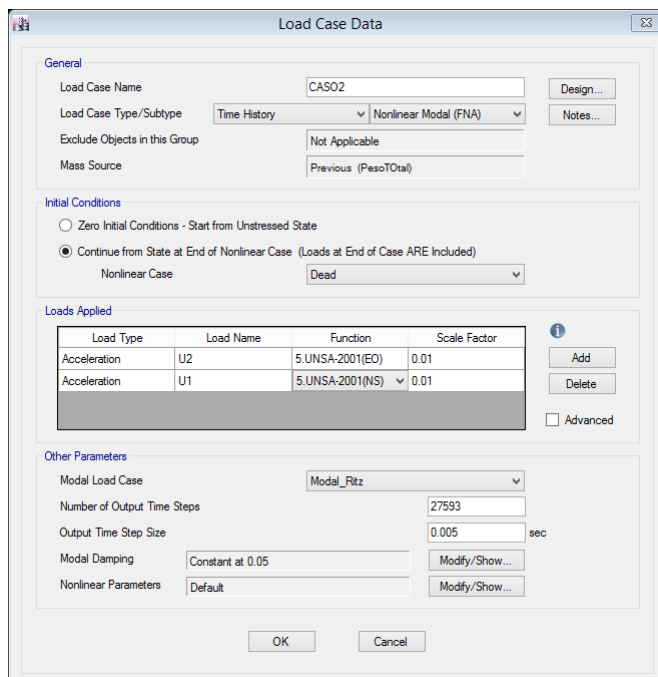


Figura 3.35: Configuración Caso 1 de Análisis

Adoptada de:Elaboración propia

- Una vez concluida estas configuraciones procedemos a ejecutar el programa y posteriormente obtener los resultados necesarios para su respectivo análisis.

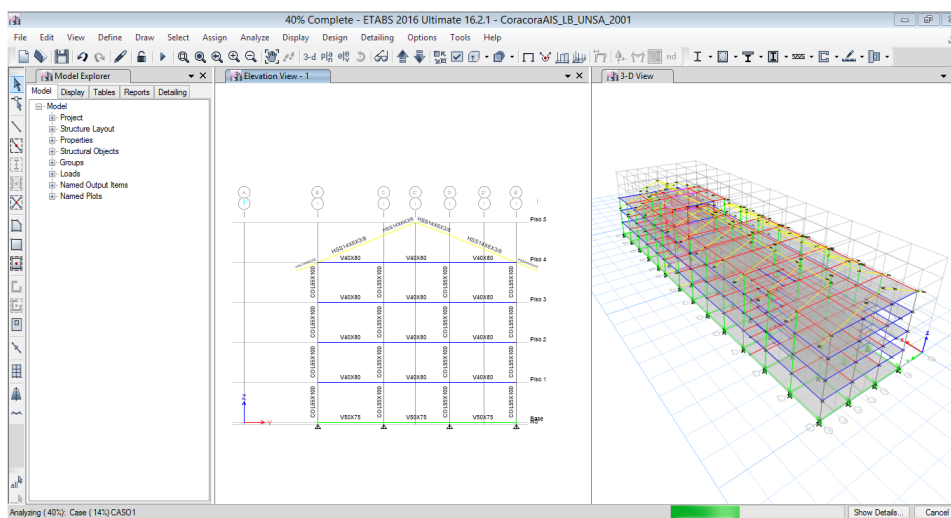


Figura 3.36: Proceso de Ejecución del Análisis Sísmico Aislado

Adoptada de:Elaboración propia

Resultados y Discusión

En el presente capítulo presentamos los resultados obtenidos y su respectivo análisis.

Los resultados son presentados de un análisis desarrollado para los 7 registros sísmicos seleccionados para los casos de análisis siguientes:

- Caso 1: La componente EO actúa en sentido X, mientras simultáneamente la componente NS actúa en sentido Y.
- Caso 2: La componente NS actúa en sentido X, mientras simultáneamente la componente EO actúa en sentido Y.

En la sección 4.1.3 se desarrolla el análisis e interpretación de los parámetros que se establece para la Funcionalidad Continua.

En las secciones 4.1.1, 4.1.2 se muestran los resultados para el análisis de respuesta en el tiempo, en estructura de base fija y base aislada respectivamente. Se presentan los desplazamientos en los ejes x e y, además de las distorsiones de entrepiso Δ_x y Δ_y respectivamente.

En la sección 4.2 se desarrolla la contrastación de hipótesis propuestas.

4.1 Análisis e interpretación.

4.1.1 Resultados del análisis sísmico con base fija

Seguidamente presentamos los resultados, que se ha ordenado en los cuadros como sigue:

4.1.1.1 Desplazamientos y distorsión de entrepiso

Cuadros 4.1: Desplazamientos y distorsión de entrepiso, base fija

Sismo PQR-1966

Piso	Caso 1				Caso 2			
	x(m)	Δ_x	y(m)	Δ_y	x(m)	Δ_x	y(m)	Δ_y
5	0.3523	0.0128	0.1920	0.0125	0.2756	0.0071	0.2161	0.0110
4	0.2958	0.0170	0.2471	0.0151	0.2446	0.0106	0.2646	0.0184
3	0.2210	0.0190	0.1807	0.0143	0.1979	0.0153	0.1835	0.0137
2	0.1376	0.0181	0.1179	0.0172	0.1306	0.0176	0.1230	0.0173
1	0.0580	0.0132	0.0423	0.0096	0.0533	0.0121	0.0467	0.0106

Sismo PQR-1970

Piso	Caso 1				Caso 2			
	x(m)	Δ_x	y(m)	Δ_y	x(m)	Δ_x	y(m)	Δ_y
5	0.3012	0.0088	0.2413	0.0009	0.3104	0.0086	0.1784	0.0147
4	0.2627	0.0120	0.2451	0.0112	0.2725	0.0111	0.2430	0.0175
3	0.2099	0.0154	0.1956	0.0159	0.2235	0.0161	0.1661	0.0131
2	0.1423	0.0191	0.1255	0.0183	0.1526	0.0207	0.1086	0.0158
1	0.0580	0.0132	0.0452	0.0103	0.0614	0.0140	0.0389	0.0088

Sismo ZAR-1974

Piso	Caso 1				Caso 2			
	x(m)	Δ_x	y(m)	Δ_y	x(m)	Δ_x	y(m)	Δ_y
5	0.2103	0.0079	0.1074	0.0107	0.1932	0.0047	0.1349	0.0063
4	0.1756	0.0095	0.1544	0.0114	0.1723	0.0067	0.1628	0.0104
3	0.1340	0.0105	0.1043	0.0080	0.1429	0.0100	0.1173	0.0090
2	0.0877	0.0120	0.0693	0.0100	0.0990	0.0132	0.0775	0.0110
1	0.035	0.008	0.0255	0.0058	0.0408	0.0093	0.0289	0.0066

Sismo PQR-1974

Piso	Caso 1				Caso 2			
	x(m)	Δ_x	y(m)	Δ_y	x(m)	Δ_x	y(m)	Δ_y
5	0.3208	0.0170	0.1943	0.0142	0.3081	0.0107	0.1913	0.0096
4	0.2459	0.0149	0.2567	0.0194	0.2610	0.0116	0.2335	0.0146

Continúa en la siguiente página

Cuadros 4.1 – Continúa de la página anterior

3	0.1802	0.0143	0.1714	0.0136	0.2098	0.0160	0.1692	0.0138
2	0.1173	0.0158	0.1117	0.0166	0.1396	0.0189	0.1085	0.0161
1	0.0477	0.0108	0.0385	0.0088	0.0567	0.0129	0.0378	0.0086

Sismo UNSA-2001

Piso	Caso 1				Caso 2			
	x(m)	Δ_x	y(m)	Δ_y	x(m)	Δ_x	y(m)	Δ_y
5	0.2985	0.0112	0.1957	0.0051	0.3103	0.0133	0.2067	0.0103
4	0.2492	0.0111	0.2182	0.0124	0.2518	0.0136	0.2518	0.0159
3	0.2002	0.0153	0.1636	0.0132	0.1920	0.0153	0.1820	0.0157
2	0.1329	0.0183	0.1056	0.0151	0.1249	0.0177	0.1130	0.0168
1	0.0522	0.0119	0.0392	0.0089	0.0469	0.0107	0.0389	0.0088

Sismo UNSA-2005

Piso	Caso 1				Caso 2			
	x(m)	Δ_x	y(m)	Δ_y	x(m)	Δ_x	y(m)	Δ_y
5	0.3523	0.0128	0.2066	0.0069	0.2153	0.0076	0.1329	0.0082
4	0.2958	0.0170	0.1762	0.0079	0.1817	0.0099	0.1689	0.0111
3	0.2210	0.0190	0.1416	0.0108	0.1382	0.0114	0.1202	0.0094
2	0.1376	0.0181	0.0939	0.0130	0.0882	0.0124	0.0786	0.0113
1	0.0580	0.0132	0.0365	0.0083	0.0336	0.0076	0.0287	0.0065

Sismo ICA-2007

Piso	Caso 1				Caso 2			
	x(m)	Δ_x	y(m)	Δ_y	x(m)	Δ_x	y(m)	Δ_y
5	0.3013	0.0113	0.2019	0.0156	0.3526	0.0149	0.2060	0.0108
4	0.2515	0.0120	0.2706	0.0177	0.2873	0.0163	0.2533	0.0160
3	0.1988	0.0145	0.1929	0.0153	0.2155	0.0176	0.1831	0.0143
2	0.1350	0.0183	0.1256	0.0185	0.1379	0.0193	0.1203	0.0174
1	0.0544	0.0124	0.0443	0.0101	0.0531	0.0121	0.0437	0.0099

Adoptada de: *Elaboración Propia*

4.1.2 Resultados del análisis sísmico con base aislada.

4.1.2.1 Desplazamientos y distorsión de entrepiso Upper Bound.

Cuadros 4.2: Desplazamientos y distorsión de entrepiso, Upper Bound

Sismo PQR-1966 Upper Bound								
Piso	Caso 1				Caso 2			
	x(m)	Δ_x	y(m)	Δ_y	x(m)	Δ_x	y(m)	Δ_y
5	0.3029	0.0015	0.2213	0.0006	0.2340	0.0011	0.2885	0.0016
4	0.2963	0.0019	0.2354	0.0027	0.2290	0.0015	0.2954	0.0022
3	0.2879	0.0022	0.2234	0.0015	0.2225	0.0017	0.2858	0.0021
2	0.2783	0.0029	0.2167	0.0025	0.2150	0.0020	0.2765	0.0027
1	0.2656	0.0025	0.2055	0.0020	0.2061	0.0020	0.2646	0.0024
Base	0.2545	-	0.1968	-	0.1975	-	0.254	-

Sismo PQR-1970 Upper Bound								
Piso	Caso 1				Caso 2			
	x(m)	Δ_x	y(m)	Δ_y	x(m)	Δ_x	y(m)	Δ_y
5	0.2265	0.0005	0.2513	0.0018	0.2576	0.0007	0.2229	0.0009
4	0.2244	0.0008	0.2591	0.0020	0.2543	0.0011	0.2269	0.0011
3	0.2210	0.0011	0.2502	0.0015	0.2496	0.0014	0.2220	0.0012
2	0.2163	0.0017	0.2434	0.0022	0.2434	0.0019	0.2167	0.0019
1	0.2090	0.0017	0.2338	0.0019	0.2349	0.0019	0.2085	0.0018
Base	0.2014	-	0.2256	-	0.2267	-	0.2007	-

Sismo ZAR-1974 Upper Bound								
Piso	Caso 1				Caso 2			
	x(m)	Δ_x	y(m)	Δ_y	x(m)	Δ_x	y(m)	Δ_y
5	0.2537	0.0002	0.2217	0.0025	0.2268	0.0007	0.2481	0.0016
4	0.2530	0.0005	0.2328	0.0023	0.2237	0.0011	0.2631	0.0024
3	0.2510	0.0009	0.2225	0.0016	0.2187	0.0016	0.2526	0.0011
2	0.2470	0.0015	0.2154	0.0025	0.2118	0.0021	0.2478	0.0021
1	0.2406	0.0018	0.2046	0.0020	0.2024	0.0020	0.2385	0.0018
Base	0.2326	-	0.1958	-	0.1935	-	0.2305	-

Continúa en la siguiente página

Cuadros 4.2 – Continúa de la página anterior

Sismo PQR-1974 Upper Bound								
Piso	Caso 1				Caso 2			
	x(m)	Δ_x	y(m)	Δ_y	x(m)	Δ_x	y(m)	Δ_y
5	0.2863	0.0004	0.2784	0.0005	0.2810	0.0010	0.2779	0.0017
4	0.2847	0.0009	0.2808	0.0016	0.2766	0.0015	0.2854	0.0018
3	0.2809	0.0014	0.2737	0.0021	0.2699	0.0021	0.2776	0.0014
2	0.2746	0.0018	0.2643	0.0029	0.2607	0.0029	0.2715	0.0021
1	0.2666	0.0018	0.2515	0.0025	0.2478	0.0022	0.2621	0.0017
Base	0.2588	-	0.2404	-	0.2382	-	0.2547	-

Sismo UNSA-2001 Upper Bound								
Piso	Caso 1				Caso 2			
	x(m)	Δ_x	y(m)	Δ_y	x(m)	Δ_x	y(m)	Δ_y
5	0.2420	0.0003	0.3929	0.0008	0.4005	0.0005	0.2431	0.0006
4	0.2405	0.0004	0.3966	0.0014	0.3982	0.0011	0.2459	0.0010
3	0.2386	0.0008	0.3905	0.0018	0.3932	0.0018	0.2416	0.0011
2	0.2349	0.0015	0.3826	0.0027	0.3851	0.0026	0.2369	0.0017
1	0.2284	0.0018	0.3708	0.0026	0.3737	0.0027	0.2296	0.0018
Base	0.2206	-	0.3593	-	0.3618	-	0.2219	-

Sismo UNSA-2005 Upper Bound								
Piso	Caso 1				Caso 2			
	x(m)	Δ_x	y(m)	Δ_y	x(m)	Δ_x	y(m)	Δ_y
5	0.2414	0.0010	0.2037	0.0007	0.2063	0.0002	0.2267	0.0029
4	0.2371	0.0012	0.2069	0.0008	0.2053	0.0003	0.2455	0.0030
3	0.2319	0.0015	0.2033	0.0007	0.2039	0.0006	0.2305	0.0016
2	0.2253	0.0023	0.2000	0.0014	0.2014	0.0011	0.2234	0.0027
1	0.2153	0.0020	0.1939	0.0013	0.1964	0.0013	0.2115	0.0019
Base	0.2065	-	0.1882	-	0.1906	-	0.2030	-

Sismo ICA-2007 Upper Bound								
Piso	Caso 1				Caso 2			
	x(m)	Δ_x	y(m)	Δ_y	x(m)	Δ_x	y(m)	Δ_y

Continúa en la siguiente página

Cuadros 4.2 – Continúa de la página anterior

5	0.2642	0.0010	0.2506	0.0014	0.2629	0.0014	0.2542	0.0023
4	0.2598	0.0015	0.2567	0.0021	0.2566	0.0017	0.2643	0.0026
3	0.2533	0.0020	0.2476	0.0019	0.2490	0.0020	0.2527	0.001
2	0.2445	0.0029	0.2392	0.0024	0.2401	0.0025	0.2484	0.0015
1	0.2318	0.0025	0.2288	0.0019	0.2291	0.0020	0.2416	0.0014
Base	0.2210	-	0.2204	-	0.2202	-	0.2353	-

Adoptada de: Elaboración Propia

4.1.2.2 Desplazamientos y distorsión de entrepiso Lower Bound.

Cuadros 4.3: Desplazamientos y distorsión de entrepiso, Lower Bound

Sismo PQR-1966 Lower Bound

Piso	Caso 1				Caso 2			
	x(m)	Δ_x	y(m)	Δ_y	x(m)	Δ_x	y(m)	Δ_y
5	0.2875	0.0009	0.3118	0.0013	0.3179	0.0007	0.2795	0.0014
4	0.2837	0.0013	0.3177	0.0018	0.3150	0.0011	0.2857	0.0017
3	0.2782	0.0016	0.3099	0.0016	0.3100	0.0016	0.2781	0.0014
2	0.2712	0.0018	0.3030	0.0023	0.3031	0.0020	0.2719	0.0019
1	0.2635	0.0017	0.2930	0.0019	0.2942	0.0020	0.2634	0.0017
Base	0.2562	-	0.2846	-	0.2855	-	0.2561	-

Sismo PQR-1970 Lower Bound

Piso	Caso 1				Caso 2			
	x(m)	Δ_x	y(m)	Δ_y	x(m)	Δ_x	y(m)	Δ_y
5	0.3027	0.0006	0.2638	0.0017	0.1744	0.0003	0.0988	0.0007
4	0.3000	0.0009	0.2714	0.0015	0.1730	0.0008	0.0957	0.0001
3	0.2960	0.0013	0.2646	0.0010	0.1696	0.0012	0.0958	0.0007
2	0.2902	0.0020	0.2602	0.0017	0.1645	0.0017	0.0926	0.0010
1	0.2814	0.0019	0.2528	0.0014	0.1569	0.0015	0.0881	0.0010
Base	0.2731	-	0.2466	-	0.1501	-	0.0839	-

Continúa en la siguiente página

Cuadros 4.3 – Continúa de la página anterior

Sismo ZAR-1974 Lower Bound								
Piso	Caso 1				Caso 2			
	x(m)	Δ_x	y(m)	Δ_y	x(m)	Δ_x	y(m)	Δ_y
5	0.3367	0.0008	0.2175	0.0019	0.2248	0.0006	0.3266	0.0019
4	0.3332	0.0012	0.2258	0.0018	0.2221	0.0009	0.3348	0.0020
3	0.3281	0.0016	0.2179	0.0013	0.2181	0.0013	0.3258	0.0017
2	0.3212	0.0022	0.2121	0.0019	0.2125	0.0017	0.3183	0.0024
1	0.3114	0.0020	0.2036	0.0016	0.2050	0.0016	0.3076	0.0021
Base	0.3024	-	0.1964	-	0.1978	-	0.2985	-

Sismo PQR-1974 Lower Bound								
Piso	Caso 1				Caso 2			
	x(m)	Δ_x	y(m)	Δ_y	x(m)	Δ_x	y(m)	Δ_y
5	0.2597	0.0012	0.3212	0.0013	0.3261	0.0010	0.2516	0.0003
4	0.2545	0.0012	0.3269	0.0017	0.3215	0.0013	0.2529	0.0008
3	0.2494	0.0011	0.3194	0.0017	0.3156	0.0018	0.2493	0.0011
2	0.2444	0.0018	0.3120	0.0025	0.3076	0.0025	0.2445	0.0016
1	0.2366	0.0017	0.3009	0.0021	0.2966	0.0022	0.2376	0.0015
Base	0.2290	-	0.2916	-	0.2867	-	0.2311	-

Sismo UNSA-2001 Lower Bound								
Piso	Caso 1				Caso 2			
	x(m)	Δ_x	y(m)	Δ_y	x(m)	Δ_x	y(m)	Δ_y
5	0.3960	0.0010	0.3794	0.0004	0.1511	0.0005	0.3907	0.0005
4	0.3914	0.0014	0.3813	0.0011	0.1489	0.0005	0.3930	0.0015
3	0.3851	0.0019	0.3764	0.0016	0.1465	0.0007	0.3866	0.0019
2	0.3767	0.0026	0.3693	0.0023	0.1432	0.0011	0.3782	0.0025
1	0.3652	0.0024	0.3591	0.0022	0.1385	0.0010	0.3670	0.0023
Base	0.3545	-	0.3493	-	0.1343	-	0.3567	-

Sismo UNSA-2005 Lower Bound								
Piso	Caso 1				Caso 2			
	x(m)	Δ_x	y(m)	Δ_y	x(m)	Δ_x	y(m)	Δ_y
5	0.2743	0.0009	0.2376	0.0028	0.2474	0.0008	0.2650	0.0027

Continúa en la siguiente página

Cuadros 4.3 – Continúa de la página anterior

4	0.2705	0.0010	0.2501	0.0023	0.2438	0.0010	0.2767	0.0023
3	0.2660	0.0013	0.2398	0.0013	0.2393	0.0013	0.2665	0.0014
2	0.2602	0.0021	0.2340	0.0021	0.2337	0.0019	0.2604	0.0022
1	0.2510	0.0018	0.2247	0.0017	0.2252	0.0017	0.2507	0.0017
Base	0.2431	-	0.2172	-	0.2176	-	0.2432	

Sismo ICA-2007 Lower Bound

Piso	Caso 1				Caso 2			
	x(m)	Δ_x	y(m)	Δ_y	x(m)	Δ_x	y(m)	Δ_y
5	0.2961	0.0003	0.2989	0.0010	0.2871	0.0010	0.2978	0.0007
4	0.2948	0.0006	0.3032	0.0015	0.2828	0.0016	0.2947	0.0003
3	0.2920	0.0011	0.2967	0.0015	0.2758	0.0021	0.2933	0.0012
2	0.2870	0.0015	0.2901	0.0022	0.2665	0.0025	0.2879	0.0017
1	0.2805	0.0017	0.2806	0.0019	0.2554	0.0023	0.2805	0.0017
Base	0.2731	-	0.2724	-	0.2455	-	0.2732	-

Adoptada de: Elaboración Propia

4.1.3 Análisis del desplazamiento en la base.

Para poder analizar el desplazamiento en la base, realizaremos el control del mismo teniendo en cuenta la capacidad máxima de desplazamiento del aislador FPT 8827/14-12/10-6 que se muestra en el cuadro 4.4

Cuadros 4.4: Capacidad de Desplazamiento

Desplazamiento Máximo UB D_M	0.295 m
Desplazamiento Máximo LB D_M	0.340 m
Capacidad de Desplazamiento D_t	0.372 m

Adoptada de: Elaboración Propia

Cuadros 4.5: Desplazamiento máximo del Aislador FPT

Sismo	Upper Bound				Lower Bound			
	Caso 1		Caso 2		Caso 1		Caso 2	
	x(m)	y(m)	x(m)	y(m)	x(m)	y(m)	x(m)	y(m)
PQR-1966	0.2545	0.1968	0.1975	0.2540	0.2562	0.2846	0.2855	0.2561
PQR-1970	0.2014	0.2256	0.2267	0.2007	0.2731	0.2466	0.1501	0.0839
ZAR-1974	0.2326	0.1958	0.1935	0.2305	0.3024	0.1964	0.1978	0.2985
PQR-1974	0.2588	0.2404	0.2382	0.2547	0.2290	0.2916	0.2867	0.2311
UNSA-2001	0.2206	0.3593	0.3618	0.2219	0.3545	0.3493	0.1343	0.3567
UNSA-2005	0.2065	0.1882	0.1906	0.2030	0.2431	0.2172	0.2176	0.2432
ICA-2007	0.2210	0.2204	0.2202	0.2353	0.2731	0.2724	0.2455	0.2732
Prom	0.2279	0.2324	0.2326	0.2286	0.2759	0.2654	0.2168	0.2490

Adoptada de: *Elaboración Propia*

Cuadros 4.6: Control de Desplazamiento del Aislador

Límite	Control Caso 1				Control Caso 2			
	x(m)		y(m)		x(m)		y(m)	
UB	0.2279	✓	0.2324	✓	0.2326	✓	0.2286	✓
LB	0.2759	✓	0.2654	✓	0.2168	✓	0.2490	✓

Adoptada de: *Elaboración Propia*

El control del desplazamiento se realiza para Upper Bound “Límite Superior” y Lower Bound “Límite Inferior”, teniendo en cuenta que para el desplazamiento del límite superior no se supere el máximo establecido para la tercera fase del movimiento D_M , mientras que para el límite inferior el desplazamiento máximo del aislador no debe superar la capacidad de desplazamiento D_t para el cual fue diseñado el aislador

En el cuadro 4.5, se presenta los desplazamientos máximos del aislador FPT 8827/14-12/10-6, para cada sismo seleccionado y los promedios sobre el cual realizamos la verificación.

En el cuadro 4.6, se puede ver que los desplazamientos máximos promedios se encuentran dentro de los desplazamiento establecidos para los límites Upper Bound (UB) y Lower

Bound (LB). Por tanto el aislador FPT 8827/14-12/10-6, al no superar los desplazamientos máximos se encuentra completamente operable.

4.1.4 Análisis de desplazamientos promedio.

En esta sección se analiza los desplazamientos promedio de acuerdo a los cuadros presentados.

Cuadros 4.7: Desplazamiento Promedio Base Fija

Piso	Caso 1		Caso 2	
	x(m)	y(m)	x(m)	y(m)
5	0.3052	0.1913	0.2808	0.1809
4	0.2538	0.2240	0.2387	0.2254
3	0.1950	0.1643	0.1885	0.1602
2	0.1272	0.1071	0.1247	0.1042
1	0.0519	0.0388	0.0494	0.0377
Base	0	0	0	0

Adoptada de: Elaboración Propia

Cuadros 4.8: Desplazamiento Promedio Base Aislada

Piso	Upper Bound				Lower Bound			
	Caso 1		Caso 2		Caso 1		Caso 2	
	x(m)	y(m)	x(m)	y(m)	x(m)	y(m)	x(m)	y(m)
5	0.2596	0.2600	0.2670	0.2516	0.3076	0.2900	0.2470	0.2729
4	0.2565	0.2669	0.2634	0.2609	0.3040	0.2966	0.2439	0.2762
3	0.2521	0.2587	0.2581	0.2518	0.2993	0.2892	0.2393	0.2708
2	0.2458	0.2517	0.2511	0.2459	0.2930	0.2830	0.2330	0.2648
1	0.2368	0.2413	0.2415	0.2366	0.2842	0.2735	0.2245	0.2564
Base	0.2279	0.2324	0.2326	0.2286	0.2759	0.2654	0.2168	0.2490

Adoptada de: Elaboración Propia

A continuación presentamos la comparación gráfica de los desplazamientos laterales promedio en cada piso para los 2 casos de análisis en las direcciones x e y.

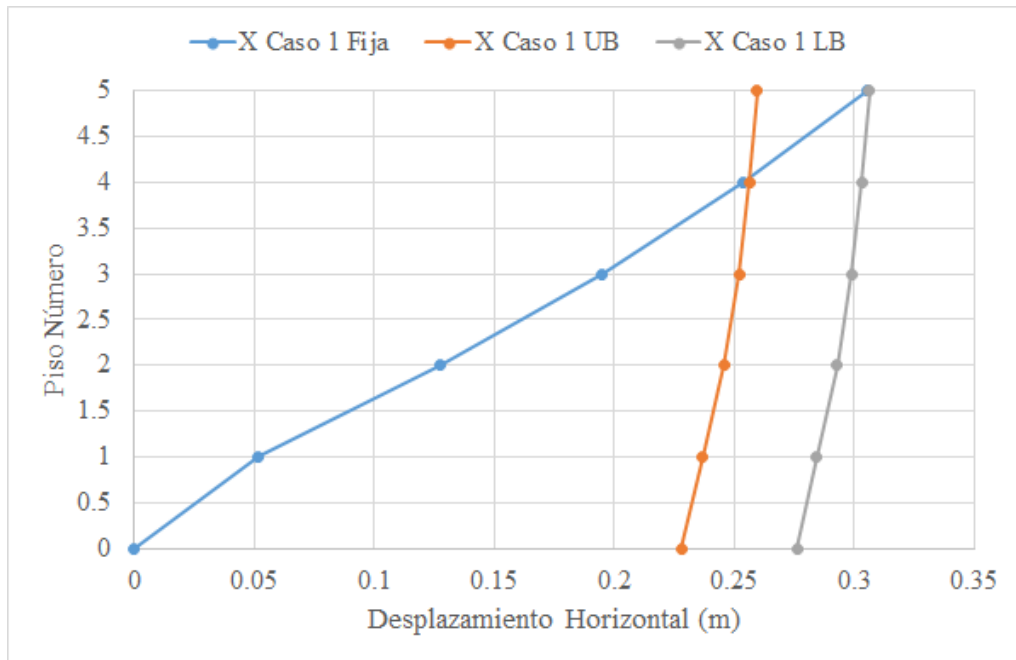


Figura 4.1: Desplazamientos Promedio Caso 1 Dirección X

Adoptada de: Elaboración Propia

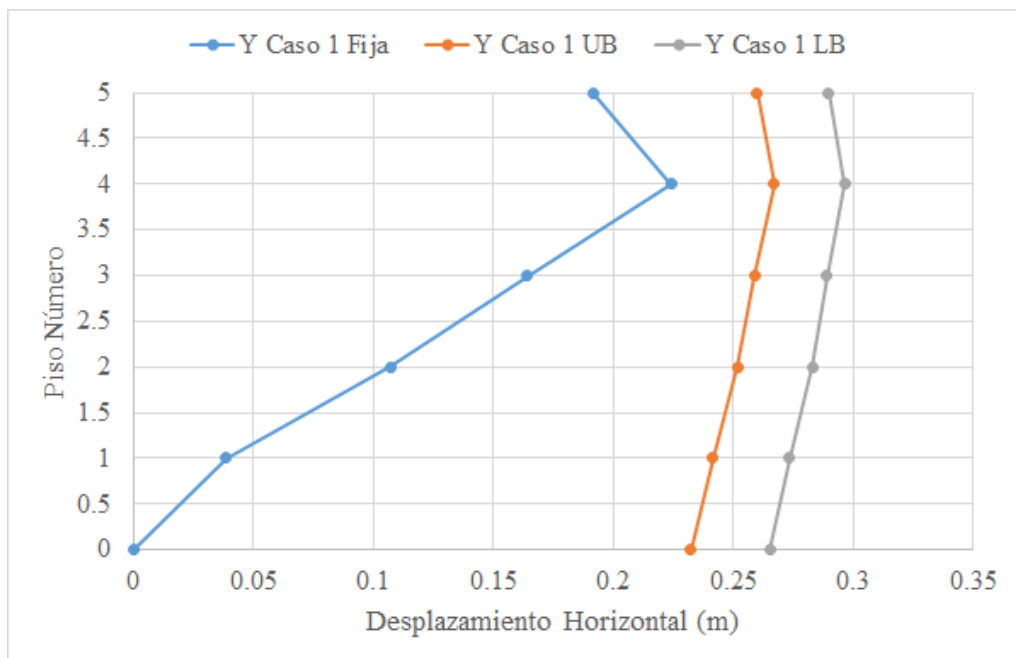


Figura 4.2: Desplazamientos Promedio Caso 1 Dirección Y

Adoptada de: Elaboración Propia

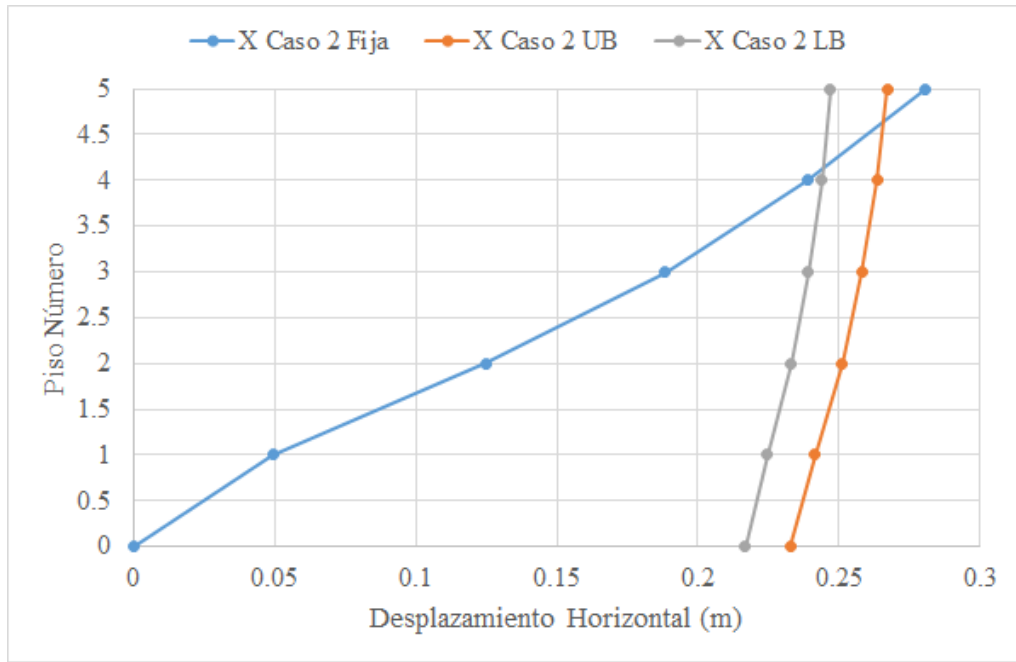


Figura 4.3: Desplazamientos Promedio Caso 2 Dirección X

Adoptada de: Elaboración Propia

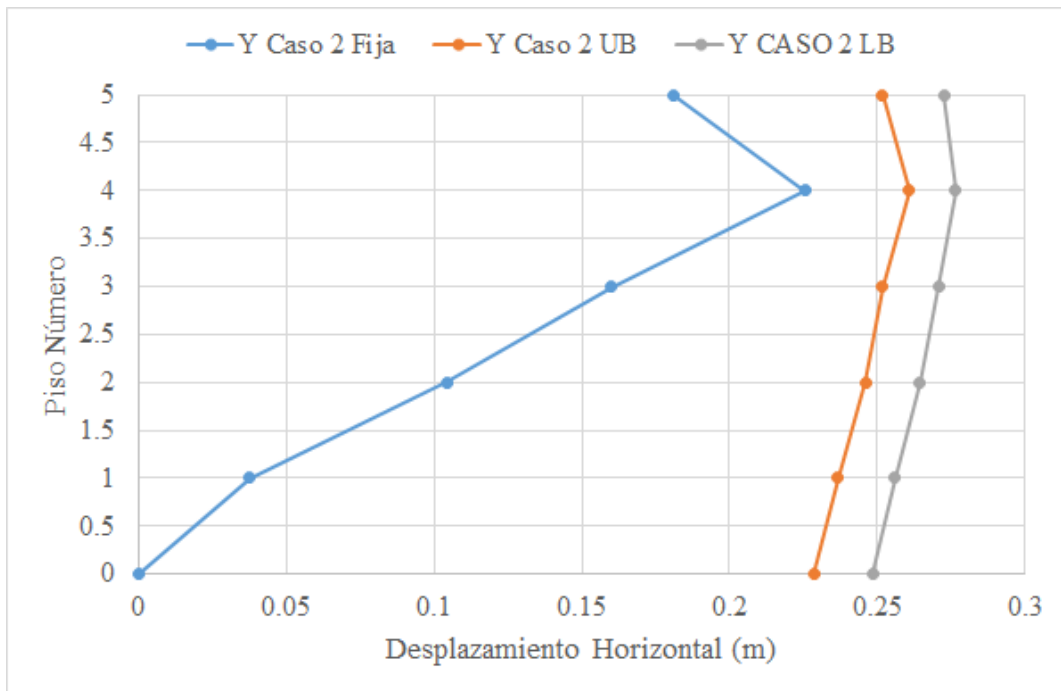


Figura 4.4: Desplazamientos Promedio Caso 2 Dirección Y

Adoptada de: Elaboración Propia

4.1.5 Análisis de la distorsión de entrepiso Δ promedio.

El análisis de las distorsiones de entrepiso promedio al igual que el análisis realizado para cada sismo, la estructura de base fija sobrepasa la distorsión de entrepiso límite 0.003, mientras que la estructura aislada se encuentra dentro de los límites de distorsión establecida, como puede apreciarse en los cuadros 4.9, 4.10 y 4.11.

Cuadros 4.9: Distorsión de Entrepiso Promedio, Base Fija

Piso	Caso 1				Caso 2			
	x	Control	y	Control	x	Control	y	Control
5	0.0117	✗	0.0035	✗	0.0096	✗	0.0101	✓
4	0.0134	✗	0.0136	✗	0.0114	✗	0.0148	✗
3	0.0154	✗	0.0130	✗	0.0145	✗	0.0127	✗
2	0.0171	✗	0.0155	✗	0.0171	✗	0.0151	✗
1	0.0118	✗	0.0088	✗	0.0112	✗	0.0085	✗

Adoptada de: Elaboración Propia

Cuadros 4.10: Distorsión de Entrepiso Promedio, Base Aislada UB

Piso	Caso 1				Caso 2			
	x	Control	y	Control	x	Control	y	Control
5	0.0007	✓	0.0012	✓	0.0008	✓	0.0017	✓
4	0.0010	✓	0.0018	✓	0.0012	✓	0.0021	✓
3	0.0014	✓	0.0016	✓	0.0016	✓	0.0014	✓
2	0.0021	✓	0.0024	✓	0.0022	✓	0.0021	✓
1	0.0020	✓	0.0020	✓	0.0020	✓	0.0018	✓

Adoptada de: Elaboración Propia

Cuadros 4.11: Distorsión de Entrepiso Promedio, Base Aislada LB

Piso	Caso 1				Caso 2			
	x	Control	y	Control	x	Control	y	Control
5	0.0008	✓	0.0015	✓	0.0007	✓	0.0012	✓
4	0.0011	✓	0.0017	✓	0.0001	✓	0.0012	✓
3	0.0014	✓	0.0014	✓	0.0014	✓	0.0013	✓
2	0.0020	✓	0.0021	✓	0.0019	✓	0.0019	✓
1	0.0019	✓	0.0018	✓	0.0018	✓	0.0017	✓

Adoptada de: *Elaboración Propia*

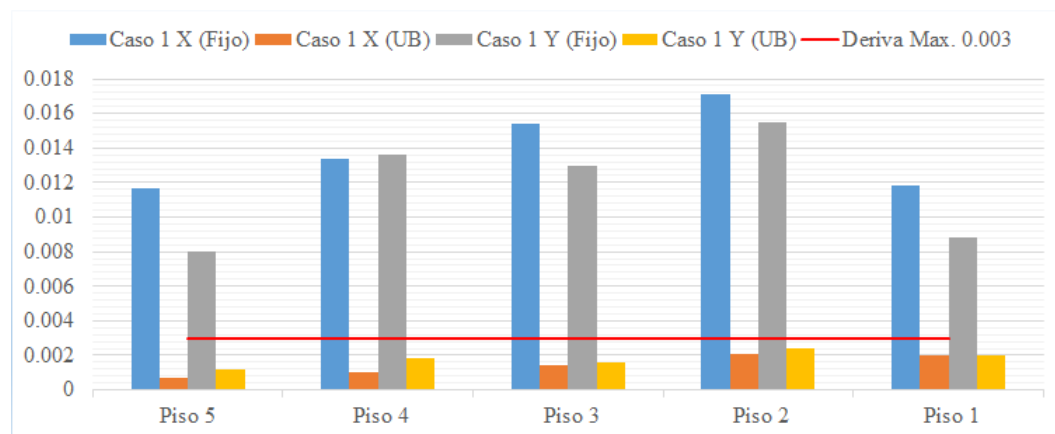


Figura 4.5: Control de Distorsión de Entrepiso Promedio UB, Caso 1

Adoptada de: *Elaboración Propia*

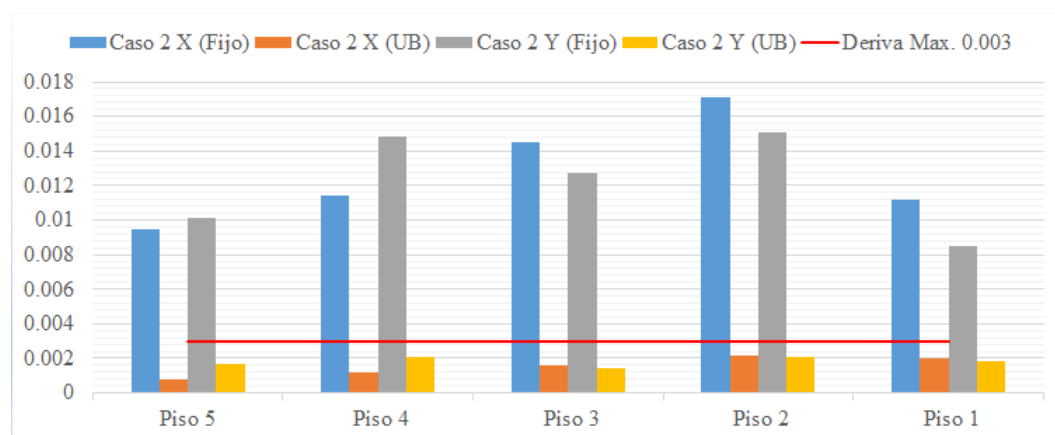


Figura 4.6: Control de Distorsión de Entrepiso Promedio UB, Caso 2

Adoptada de: *Elaboración Propia*

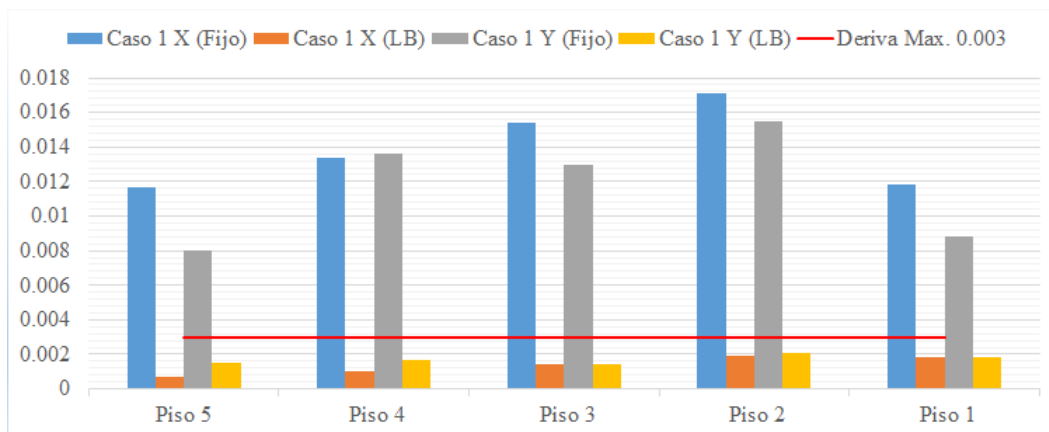


Figura 4.7: Control de Distorsión de Entrepiso Promedio LB, Caso 1

Adoptada de: Elaboración Propia

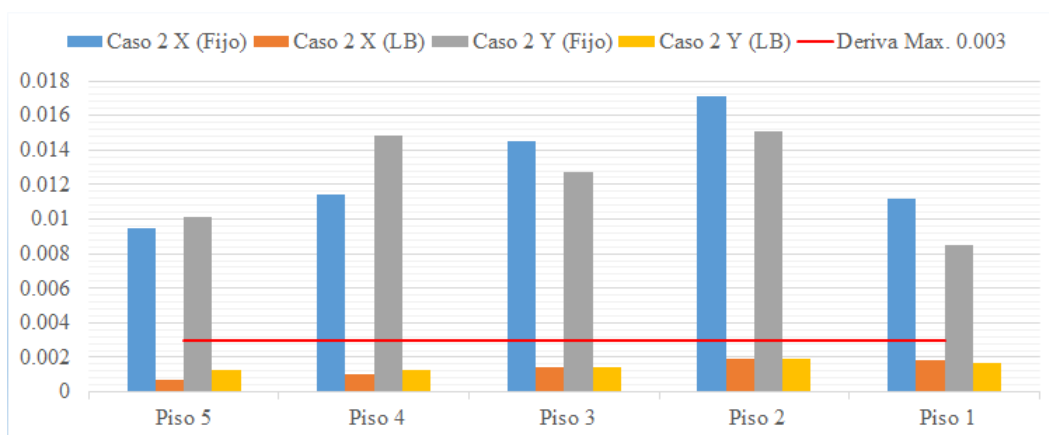


Figura 4.8: Control de Distorsión de Entrepiso Promedio LB, Caso 2

Adoptada de: Elaboración Propia

4.1.6 Análisis de las aceleraciones máximas de piso.

Para poder analizar las aceleraciones máximas de piso, es necesario realizar el control de la aceleración máxima establecida para la funcionalidad continua **0.4g**, que se establece como uno de los principios para la funcionalidad continua. A continuación se muestran los cuadros en las cuales se evalúan si se cumple el principio en la estructura de base fija y de base aislada con propiedades Upper Bound "Límite Superior".

Cuadros 4.12: Análisis de aceleraciones máximas de piso (g).

Aceleraciones de piso (g). Sismo PQR-1966, Base Fija

Continúa en la siguiente página



Cuadros 4.12 – Continúa de la página anterior

Piso	Caso 1				Caso 2			
	x(m)	Δ_x	y(m)	Δ_y	x(m)	Δ_x	y(m)	Δ_y
5	3.2139	✗	2.2715	✗	3.4975	✗	1.9446	✗
4	1.7152	✗	2.4701	✗	1.8281	✗	2.4842	✗
3	1.5535	✗	1.6926	✗	1.4699	✗	2.1601	✗
2	1.0853	✗	1.3443	✗	1.2762	✗	2.1554	✗
1	0.7389	✗	0.7790	✗	0.6961	✗	1.0523	✗
Base	0.7440	✗	0.7021	✗	0.7479	✗	0.7440	✗

Aceleraciones de piso (g). Sismo PQR-1966, Base Aislada UB

Piso	Caso 1				Caso 2			
	x(m)	Δ_x	y(m)	Δ_y	x(m)	Δ_x	y(m)	Δ_y
5	0.4514	✗	0.2922	✓	0.4602	✗	0.3154	✓
4	0.2836	✓	0.3067	✓	0.2857	✓	0.3032	✓
3	0.1954	✓	0.1928	✓	0.1573	✓	0.2390	✓
2	0.1576	✓	0.1745	✓	0.1353	✓	0.1527	✓
1	0.1660	✓	0.2977	✓	0.2316	✓	0.2052	✓
Base	0.2206	✓	0.3430	✓	0.2429	✓	0.2445	✓

Aceleraciones de piso (g). Sismo PQR-1966, Base Aislada LB

Piso	Caso 1				Caso 2			
	x(m)	Δ_x	y(m)	Δ_y	x(m)	Δ_x	y(m)	Δ_y
5	0.2665	✓	0.2253	✓	0.3856	✓	0.2156	✓
4	0.1972	✓	0.1982	✓	0.1987	✓	0.1824	✓
3	0.1374	✓	0.1400	✓	0.1171	✓	0.1603	✓
2	0.1154	✓	0.1002	✓	0.0964	✓	0.1115	✓
1	0.1036	✓	0.1785	✓	0.1443	✓	0.1273	✓
Base	0.1332	✓	0.2183	✓	0.1641	✓	0.1334	✓

Aceleraciones de piso (g). Sismo PQR-1970, Base Fija

Piso	Caso 1				Caso 2			
	x(m)	Δ_x	y(m)	Δ_y	x(m)	Δ_x	y(m)	Δ_y
5	3.1864	✗	2.5880	✗	3.2363	✗	2.7739	✗

Continúa en la siguiente página

Cuadros 4.12 – Continúa de la página anterior

4	1.5039	✗	2.1623	✗	1.6886	✗	1.9595	✗
3	1.2604	✗	1.9116	✗	1.4155	✗	1.9820	✗
2	1.0277	✗	1.4431	✗	1.0440	✗	1.3635	✗
1	0.7587	✗	0.9072	✗	0.6841	✗	0.8699	✗
Base	0.6247	✗	0.7148	✗	0.7148	✗	0.6247	✗

Aceleraciones de piso (g). Sismo PQR-1970, Base Aislada UB

Piso	Caso 1				Caso 2			
	x(m)	Δ_x	y(m)	Δ_y	x(m)	Δ_x	y(m)	Δ_y
5	0.3142	✓	0.1902	✓	0.2169	✓	0.2109	✓
4	0.2028	✓	0.2115	✓	0.1650	✓	0.2719	✓
3	0.1200	✓	0.1419	✓	0.1115	✓	0.1508	✓
2	0.0998	✓	0.1146	✓	0.1011	✓	0.1032	✓
1	0.1295	✓	0.1285	✓	0.0845	✓	0.1818	✓
Base	0.1516	✓	0.1795	✓	0.0827	✓	0.2806	✓

Aceleraciones de piso (g). Sismo PQR-1970, Base Aislada LB

Piso	Caso 1				Caso 2			
	x(m)	Δ_x	y(m)	Δ_y	x(m)	Δ_x	y(m)	Δ_y
5	0.3145	✓	0.1902	✓	0.2170	✓	0.2109	✓
4	0.2027	✓	0.2115	✓	0.1651	✓	0.2719	✓
3	0.1199	✓	0.1419	✓	0.1116	✓	0.1508	✓
2	0.0998	✓	0.1146	✓	0.1012	✓	0.1032	✓
1	0.1296	✓	0.1285	✓	0.0844	✓	0.1819	✓
Base	0.1516	✓	0.1795	✓	0.0828	✓	0.2806	✓

Aceleraciones de piso (g). Sismo ZAR-1974, Base Fija

Piso	Caso 1				Caso 2			
	x(m)	Δ_x	y(m)	Δ_y	x(m)	Δ_x	y(m)	Δ_y
5	1.9626	✗	1.3577	✗	2.4271	✗	1.7424	✗
4	1.2578	✗	1.1512	✗	1.3242	✗	1.3213	✗
3	0.9945	✗	1.0912	✗	0.9168	✗	1.2185	✗

Continúa en la siguiente página

Cuadros 4.12 – Continúa de la página anterior

2	0.7325	✗	0.8823	✗	0.6930	✗	1.0854	✗
1	0.4871	✗	0.5653	✗	0.4861	✗	0.5539	✗
Base	0.5244	✗	0.4959	✗	0.4959	✗	0.5244	✗

Aceleraciones de piso (g). Sismo ZAR-1974, Base Aislada UB

Piso	Caso 1				Caso 2			
	x(m)	Δ_x	y(m)	Δ_y	x(m)	Δ_x	y(m)	Δ_y
5	0.3685	✓	0.2151	✓	0.3379	✓	0.2317	✓
4	0.2732	✓	0.2407	✓	0.2376	✓	0.2823	✓
3	0.1710	✓	0.1640	✓	0.1361	✓	0.2012	✓
2	0.1139	✓	0.1249	✓	0.1132	✓	0.1266	✓
1	0.1746	✓	0.1917	✓	0.1482	✓	0.2357	✓
Base	0.2251	✓	0.2206	✓	0.1728	✓	0.2807	✓

Aceleraciones de piso (g). Sismo ZAR-1974, Base Aislada LB

Piso	Caso 1				Caso 2			
	x(m)	Δ_x	y(m)	Δ_y	x(m)	Δ_x	y(m)	Δ_y
5	0.2407	✓	0.1322	✓	0.2117	✓	0.1725	✓
4	0.1815	✓	0.1582	✓	0.1540	✓	0.2132	✓
3	0.1511	✓	0.1285	✓	0.1027	✓	0.1640	✓
2	0.1244	✓	0.0801	✓	0.0794	✓	0.1324	✓
1	0.1428	✓	0.1222	✓	0.0854	✓	0.1764	✓
Base	0.1642	✓	0.1692	✓	0.1157	✓	0.2029	✓

Aceleraciones de piso (g). Sismo PQR-1974, Base Fija

Piso	Caso 1				Caso 2			
	x(m)	Δ_x	y(m)	Δ_y	x(m)	Δ_x	y(m)	Δ_y
5	3.6757	✗	2.5502	✗	2.9898	✗	2.3500	✗
4	1.9933	✗	2.1517	✗	1.8176	✗	2.4390	✗
3	1.3989	✗	2.0357	✗	1.3281	✗	1.9080	✗
2	0.9955	✗	1.5739	✗	1.1497	✗	1.4703	✗
1	0.7438	✗	0.9231	✗	0.7367	✗	0.9447	✗

Continúa en la siguiente página

Cuadros 4.12 – Continúa de la página anterior

Base	0.8603	✗	0.6787	✗	0.6787	✗	0.8603	✗
------	--------	---	--------	---	--------	---	--------	---

Aceleraciones de piso (g). Sismo PQR-1974, Base Aislada UB

Piso	Caso 1				Caso 2			
	x(m)	Δ_x	y(m)	Δ_y	x(m)	Δ_x	y(m)	Δ_y
5	0.4349	✗	0.3246	✓	0.3868	✓	0.3033	✓
4	0.3581	✓	0.3254	✓	0.2587	✓	0.3117	✓
3	0.2251	✓	0.2174	✓	0.1697	✓	0.2314	✓
2	0.1437	✓	0.1590	✓	0.1440	✓	0.1817	✓
1	0.1773	✓	0.2267	✓	0.1671	✓	0.2324	✓
Base	0.2092	✓	0.3244	✓	0.2058	✓	0.2901	✓

Aceleraciones de piso (g). Sismo PQR-1974, Base Aislada LB

Piso	Caso 1				Caso 2			
	x(m)	Δ_x	y(m)	Δ_y	x(m)	Δ_x	y(m)	Δ_y
5	0.3050	✓	0.2557	✓	0.3395	✓	0.2015	✓
4	0.2210	✓	0.2757	✓	0.2378	✓	0.2437	✓
3	0.1350	✓	0.1794	✓	0.1579	✓	0.1699	✓
2	0.1055	✓	0.1346	✓	0.1234	✓	0.1156	✓
1	0.1449	✓	0.1617	✓	0.1313	✓	0.1556	✓
Base	0.1721	✓	0.2373	✓	0.1488	✓	0.2111	✓

Aceleraciones de piso (g). Sismo UNSA-2001, Base Fija

Piso	Caso 1				Caso 2			
	x(m)	Δ_x	y(m)	Δ_y	x(m)	Δ_x	y(m)	Δ_y
5	3.1189	✗	2.5664	✗	2.8462	✗	2.4998	✗
4	1.5712	✗	2.3697	✗	1.6781	✗	2.4151	✗
3	1.4290	✗	1.8119	✗	1.3627	✗	1.6242	✗
2	0.9087	✗	1.4505	✗	0.9983	✗	1.5136	✗
1	0.8660	✗	1.1567	✗	0.7282	✗	0.9139	✗
Base	0.5293	✗	0.6091	✗	0.6541	✗	0.6151	✗

Aceleraciones de piso (g). Sismo UNSA-2001, Base Aislada UB

Continúa en la siguiente página

Cuadros 4.12 – Continúa de la página anterior

Piso	Caso 1				Caso 2			
	x(m)	Δ_x	y(m)	Δ_y	x(m)	Δ_x	y(m)	Δ_y
5	0.3969	✓	0.2804	✓	0.4628	✓	0.2990	✓
4	0.2751	✓	0.3510	✓	0.3388	✓	0.3143	✓
3	0.1821	✓	0.2046	✓	0.1872	✓	0.2330	✓
2	0.1443	✓	0.1779	✓	0.1210	✓	0.1928	✓
1	0.1804	✓	0.2383	✓	0.1742	✓	0.2279	✓
Base	0.2404	✓	0.3249	✓	0.2400	✓	0.3146	✓

Aceleraciones de piso (g). Sismo UNSA-2001, Base Aislada LB

Piso	Caso 1				Caso 2			
	x(m)	Δ_x	y(m)	Δ_y	x(m)	Δ_x	y(m)	Δ_y
5	0.2959	✓	0.2267	✓	0.3224	✓	0.2244	✓
4	0.2148	✓	0.2780	✓	0.2007	✓	0.2387	✓
3	0.1594	✓	0.1744	✓	0.1434	✓	0.1718	✓
2	0.1363	✓	0.1421	✓	0.0882	✓	0.1440	✓
1	0.1449	✓	0.1703	✓	0.1420	✓	0.1582	✓
Base	0.1758	✓	0.2590	✓	0.1494	✓	0.2283	✓

Aceleraciones de piso (g). Sismo UNSA-2005, Base Fija

Piso	Caso 1				Caso 2			
	x(m)	Δ_x	y(m)	Δ_y	x(m)	Δ_x	y(m)	Δ_y
5	1.9277	✗	1.2742	✗	2.0019	✗	1.5087	✗
4	0.9956	✗	1.7007	✗	1.1923	✗	1.5624	✗
3	0.9361	✗	1.2934	✗	0.8935	✗	1.1267	✗
2	0.5588	✗	1.3502	✗	0.7508	✗	0.8406	✗
1	0.4391	✗	0.7458	✗	0.4092	✗	0.5720	✗
Base	0.4696	✗	0.3957	✗	0.3223	✗	0.5976	✗

Aceleraciones de piso (g). Sismo UNSA-2005, Base Aislada UB

Piso	Caso 1				Caso 2			
	x(m)	Δ_x	y(m)	Δ_y	x(m)	Δ_x	y(m)	Δ_y

Continúa en la siguiente página

Cuadros 4.12 – Continúa de la página anterior

5	0.3492	✓	0.1935	✓	0.2711	✓	0.2321	✓
4	0.2290	✓	0.2553	✓	0.1940	✓	0.2761	✓
3	0.1701	✓	0.1810	✓	0.1524	✓	0.1741	✓
2	0.1118	✓	0.1230	✓	0.1091	✓	0.1236	✓
1	0.1484	✓	0.1942	✓	0.1469	✓	0.2052	✓
Base	0.1935	✓	0.2290	✓	0.1645	✓	0.2848	✓

Aceleraciones de piso (g). Sismo UNSA-2005, Base Aislada LB

Piso	Caso 1				Caso 2			
	x(m)	Δ_x	y(m)	Δ_y	x(m)	Δ_x	y(m)	Δ_y
5	0.2645	✓	0.1466	✓	0.1936	✓	0.1670	✓
4	0.1781	✓	0.2136	✓	0.1689	✓	0.2038	✓
3	0.1085	✓	0.1476	✓	0.1267	✓	0.1292	✓
2	0.0945	✓	0.0904	✓	0.0828	✓	0.0971	✓
1	0.1029	✓	0.1408	✓	0.1162	✓	0.1316	✓
Base	0.1181	✓	0.1686	✓	0.1269	✓	0.1783	✓

Aceleraciones de piso (g). Sismo ICA-2007, Base Fija

Piso	Caso 1				Caso 2			
	x(m)	Δ_x	y(m)	Δ_y	x(m)	Δ_x	y(m)	Δ_y
5	3.1369	✗	2.192	✗	3.4249	✗	2.3191	✗
4	1.7316	✗	2.0371	✗	1.513	✗	2.5163	✗
3	1.0888	✗	1.6656	✗	1.1702	✗	1.7779	✗
2	1.054	✗	1.4015	✗	0.8695	✗	1.3861	✗
1	0.9337	✗	1.0166	✗	0.6401	✗	0.9786	✗
Base	0.6391	✗	0.5929	✗	0.5178	✗	0.6391	✗

Aceleraciones de piso (g). Sismo ICA-2007, Base Aislada UB

Piso	Caso 1				Caso 2			
	x(m)	Δ_x	y(m)	Δ_y	x(m)	Δ_x	y(m)	Δ_y
5	0.3221	✓	0.2623	✓	0.3617	✓	0.2371	✓
4	0.2172	✓	0.2655	✓	0.2556	✓	0.2481	✓
3	0.1751	✓	0.2159	✓	0.1848	✓	0.1983	✓

Continúa en la siguiente página

Cuadros 4.12 – *Continúa de la página anterior*

2	0.1365	✓	0.1425	✓	0.1331	✓	0.1530	✓
1	0.1577	✓	0.1965	✓	0.1543	✓	0.2020	✓
Base	0.1778	✓	0.2475	✓	0.1837	✓	0.2434	✓

Aceleraciones de piso (g). Sismo ICA-2007, Base Aislada LB

Piso	Caso 1				Caso 2			
	x(m)	Δ_x	y(m)	Δ_y	x(m)	Δ_x	y(m)	Δ_y
5	0.2753	✓	0.1947	✓	0.2723	✓	0.1556	✓
4	0.1864	✓	0.2250	✓	0.2003	✓	0.1944	✓
3	0.1384	✓	0.1822	✓	0.1530	✓	0.1491	✓
2	0.1125	✓	0.1307	✓	0.1158	✓	0.0973	✓
1	0.1268	✓	0.1752	✓	0.1356	✓	0.1177	✓
Base	0.1609	✓	0.208	✓	0.1611	✓	0.1609	✓

Adoptada de: Elaboración Propia

En los cuadros en las cuales se han presentado las aceleraciones de piso para cada sismo y para los Límites Superior (UB) e Inferior (LB), se puede apreciar que para todos los sismos de análisis, la aceleración máxima establecida 0.4g para estructura con base fija o empotrada es superada ampliamente, mientras que para las propiedades UB y LB las aceleraciones de piso se encuentran dentro de la aceleración máxima establecida 0.4g. De lo descrito se deduce que el aislador FPT 8827/14-12/10-6 cumple con la condición de la aceleración máxima que establece la Funcionalidad Continua.

4.1.7 Análisis de las aceleraciones máximas de piso promedio.

A continuación se presentan los cuadros con las aceleraciones máximas promedio, las cuales al igual que en el análisis individual para cada sismo, las aceleraciones de base fija superan la aceleración establecida para la funcionalidad continua teniendo la siguiente relación máxima para el Caso 2 “Y” de análisis, $2,9177 (g) > 0,4 (g)$. Por el contrario las aceleraciones máximas en la estructura aislada cumple con la aceleración establecida por la funcionalidad continua, obteniéndose la siguiente relación máxima, $0,3682 (g) > 0,4 (g)$ y

$0,2804 \text{ (g)} > 0,4 \text{ (g)}$, para propiedades límite superior (Upper Bound UB) y límite inferior (Lower Bound LB)

Cuadros 4.13: Aceleraciones de Piso (g) - Promedio, Base Fija

Piso	Caso 1				Caso 2			
	x(g)	Control	y(g)	Control	x(g)	Control	y(g)	Control
5	2.8889	✗	2.1143	✗	2.9177	✗	2.1626	✗
4	1.5384	✗	2.0061	✗	1.5774	✗	2.0997	✗
3	1.2373	✗	1.6431	✗	1.2224	✗	1.6853	✗
2	0.9089	✗	1.3494	✗	0.9688	✗	1.4021	✗
1	0.7096	✗	0.8705	✗	0.6258	✗	0.8408	✗
Base	0.6273	✗	0.5985	✗	0.5902	✗	0.6579	✗

Adoptada de: Elaboración Propia

Cuadros 4.14: Aceleraciones de Piso (g) - Promedio, Base Aislada UB

Piso	Caso 1				Caso 2			
	x(g)	Control	y(g)	Control	x(g)	Control	y(g)	Control
5	0.3937	✓	0.2575	✓	0.3798	✓	0.2727	✓
4	0.2754	✓	0.2869	✓	0.2577	✓	0.2975	✓
3	0.1862	✓	0.1968	✓	0.1638	✓	0.2182	✓
2	0.1327	✓	0.1493	✓	0.1267	✓	0.1548	✓
1	0.1683	✓	0.2204	✓	0.1688	✓	0.2204	✓
Base	0.2109	✓	0.2788	✓	0.2018	✓	0.2898	✓

Adoptada de: Elaboración Propia

Cuadros 4.15: Aceleraciones de Piso (g) - Promedio, Base Aislada LB

Piso	Caso 1				Caso 2			
	x(g)	Control	y(g)	Control	x(g)	Control	y(g)	Control
5	0.2803	✓	0.1959	✓	0.2774	✓	0.1925	✓
4	0.1974	✓	0.2229	✓	0.1894	✓	0.2212	✓
3	0.1357	✓	0.1563	✓	0.1303	✓	0.1564	✓
2	0.1126	✓	0.1132	✓	0.0982	✓	0.1144	✓
1	0.1279	✓	0.1539	✓	0.1199	✓	0.1498	✓
Base	0.1537	✓	0.2057	✓	0.1355	✓	0.1994	✓

Adoptada de: *Elaboración Propia*

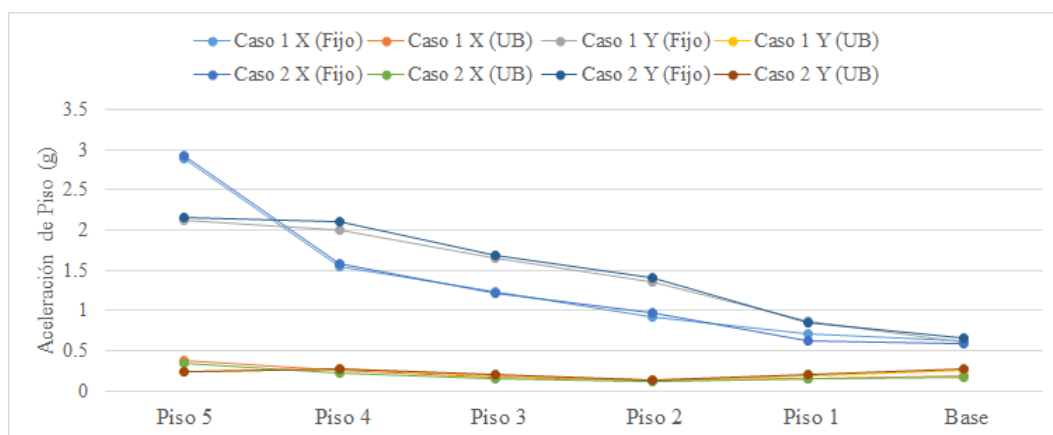


Figura 4.9: Aceleraciones de Piso (g) - Promedio UB

Adoptada de: *Elaboración Propia*

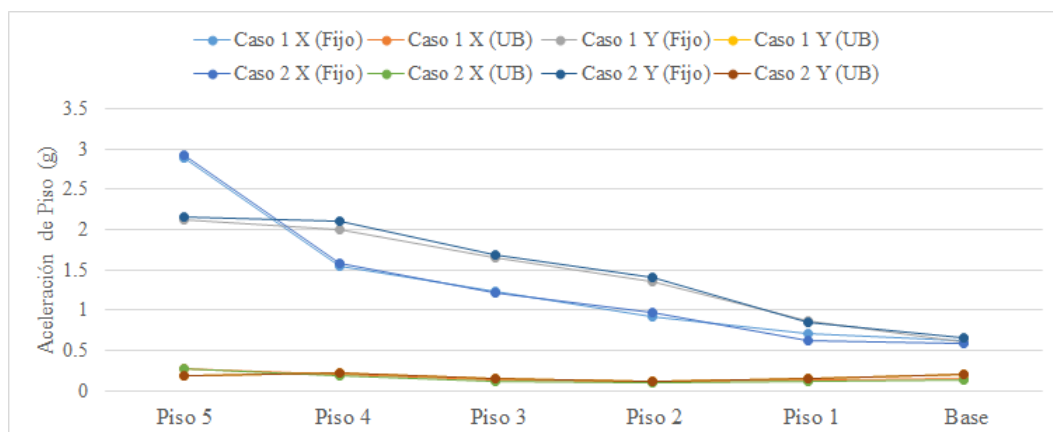


Figura 4.10: Aceleraciones de Piso (g) - Promedio LB

Adoptada de: *Elaboración Propia*

4.1.8 Incidencia del costo de aisladores con respecto al costo directo total.

Para realizar el análisis de incidencia del costo, presentamos los cuadros en la cual se encuentran los costos para la muestra de estudio Hospital de Coracora.

Cuadros 4.16: Costo directo total

Componente	Costo S/
Obras Provisionales y Trabajos Preliminares	795,981.64
Estructuras	13,131,639.37
Arquitectura	9,239,742.64
Instalaciones Sanitarias	2,545,650.15
Instalaciones Eléctricas y Comunicaciones	6,006,561.19
Instalaciones Mecánicas	7,655,019.39
Costo Directo Total (CDT)	39,374,594.38

Adoptada de: GRA

Cuadros 4.17: Costo de aisladores sísmicos FPT 8827/14-12/10-6

Descripción	Unidad	Cantidad	CU	Total S/
Aisladores Coracora	und	66	26,900.00	1,775,400.00
Flete (Transporte a Obra)	glb	1	44,385.00	44,385.00
Costo Total de Aisladores (CTA)	-	-	-	1,819,785.00

Adoptada de: GRA

Cuadros 4.18: Porcentaje de incidencia

CDT S/	CTA S/	%
39,374,594.38	1,819,785.00	4.6217

Adoptada de: Elaboración Propia

En el cuadro 4.18, notamos que el costo total de aisladores (CTA) representa el 4.6217% del costo directo total (CDT).

4.2 Contrastación de hipótesis

4.2.1 Hipótesis General

Si se desarrolla el diseño de la estructura con criterios para la funcionalidad continua, se puede garantizar la protección de elementos estructurales así como también elementos no estructurales, garantizando su operatividad, sin ver afectadas sus capacidades de prestación de servicios.

Decisión: Teniendo en cuenta la muestra que es el Hospital de Coracora y que la hipótesis general se concretiza a partir de las hipótesis específicas, entonces por lo analizado en las hipótesis específicas, validamos esta hipótesis únicamente para la estructura aislada ya que es la única que cumple los parámetros establecidos para la funcionalidad continua la cual garantiza que cumpliendo sus parámetros se protegen los elementos estructurales, no estructurales y contenido de una edificación.

4.2.2 Hipótesis específicas.

1. Si se realiza el análisis sísmico teniendo en cuenta que la estructura es convencional con base fija, podremos conocer el comportamiento estructural con las características convencionales y así poder determinar que si se satisfacen las condiciones para la funcionalidad continua.

Supuestos:

- Se ha obtenido la información para la funcionalidad continua, que consta de parámetros establecidos que se tienen que cumplir, la cual será nuestra regla de decisión.
- Se han realizado los cálculos necesarios para la muestra seleccionada, Hospital de Coracora, considerando su estructura con base fija.

Regla de decisión

- Coeficiente de reducción sísmica $R=1$.
- Distorsiones ó derivas de entrepiso máxima menores a 0.003.
- Aceleraciones de piso menores a 0.4g.

Cálculo:

La comparación de estos parámetros se ha desarrollado en la sección del análisis de resultados, por lo que se tiene definida una decisión para la presente hipótesis.

Decisión:

Rechazamos la presente hipótesis, debido a que se plantea que la estructura de base fija puede satisfacer los parámetros para funcionalidad continua, sin embargo luego del análisis de los resultados, se tiene que NO se satisfacen las condiciones para la funcionalidad continua.

2. Si realizamos un análisis sísmico a la estructura implementada con aisladores de base de péndulo triple de fricción FPT 8827/14-12/10-6, entonces podremos conocer el comportamiento de la estructura aislada y así poder determinar si se satisfacen las condiciones para la funcionalidad continua.

Supuestos:

- Se ha obtenido la información para la funcionalidad continua, que consta de parámetros establecidos que se tienen que cumplir, la cual será nuestra regla de decisión.
- Se han realizado los cálculos necesarios para la muestra seleccionada, Hospital de Coracora, considerando su estructura con base aislada contando con el aislador FPT 8827/14-12/10-6.

Regla de decisión:

- Coeficiente de reducción sísmica $R=1$.
- Distorsiones ó derivas de entrepiso máxima menores a 0.003.
- Aceleraciones de piso menores a 0.4g.

Cálculo:

La análisis de estos parámetros se ha desarrollado en la sección anterior del análisis de resultados, por lo que se tiene definida una decisión para la presente hipótesis.

Decisión:

Validamos la presente hipótesis, debido a que se plantea que la estructura aislada con FPT 8827/14-12/10-6 puede satisfacer los parámetros para la funcionalidad continua, y efectivamente, luego del análisis de los resultados, se tiene que SI se satisfacen las condiciones para la funcionalidad continua.

3. Al realizar un análisis de los resultados de distorsiones de entrepiso y aceleraciones de piso, comparando el comportamiento de los modelos de base convencional fija y base aislada, podemos determinar variaciones porcentuales superiores al 200 % de un modelo con respecto al otro.

Supuestos:

- Se ha obtenido la información para la funcionalidad continua, que consta de parámetros establecidos que se tienen que cumplir, la cual será nuestra regla de decisión.

- Se han realizado los cálculos necesarios para la muestra seleccionada, Hospital de Coracora, considerando su estructura con base convencional fija y con base aislada contando con el aislador FPT 8827/14-12/10-6.

Regla de decisión:

- Porcentaje de variación entre ambos modelos.
- Porcentaje de Variación de distorsiones ó derivas de entrepiso máxima.
- Porcentaje de variación de aceleraciones de piso.

Cálculo:

Cuadros 4.19: Porcentaje de variación en distorsiones, Base Fija-UB-CASO 1

Piso	% de Variacion X			% de Variación Y		
	x	x UB	% Var	y	y UB	% Var
5	0.0117	0.0007	1671	0.0080	0.0012	667
4	0.0134	0.0010	1340	0.0136	0.0018	756
3	0.0154	0.0014	1100	0.0130	0.0016	813
2	0.0171	0.0021	814	0.0155	0.0024	646
1	0.0118	0.0020	590	0.0088	0.0020	440

Adoptada de: Elaboración Propia

Cuadros 4.20: Porcentaje de variación en distorsiones, Base Fija-LB-CASO 1

Piso	% de Variacion X			% de Variación Y		
	x	x LB	% Var	y	y LB	% Var
5	0.0117	0.0008	1463	0.0080	0.0015	533
4	0.0134	0.0011	1218	0.0136	0.0017	800
3	0.0154	0.0014	1100	0.0130	0.0014	929
2	0.0171	0.0020	855	0.0155	0.0021	738
1	0.0118	0.0019	621	0.0088	0.0018	489

Adoptada de: Elaboración Propia

Cuadros 4.21: Porcentaje de variación en aceleraciones, Base Fija-UB-CASO 1

Piso	% de Variación X			% de Variación Y		
	x(g)	x UB(g)	% Var	y(g)	y UB(g)	% Var
5	2.8889	0.3937	734	2.1143	0.2575	821
4	1.5384	0.2754	559	2.0061	0.2869	699
3	1.2373	0.1862	665	1.6431	0.1968	835
2	0.9089	0.1327	685	1.3494	0.1493	904
1	0.7096	0.1683	422	0.8705	0.2204	395
Base	0.6273	0.2109	297	0.5985	0.2788	215

Adoptada de: Elaboración Propia

Cuadros 4.22: Porcentaje de variación en aceleraciones, Base Fija-LB-CASO 1

Piso	% de Variación X			% de Variación Y		
	x(g)	x LB(g)	% Var	y(g)	y LB(g)	% Var
5	2.8889	0.2803	1031	2.1143	0.1959	1079
4	1.5384	0.1974	779	2.0061	0.2229	900
3	1.2373	0.1357	912	1.6431	0.1563	1051
2	0.9089	0.1126	807	1.3494	0.1132	1192
1	0.7096	0.1279	555	0.8705	0.1539	566
Base	0.6273	0.1537	408	0.5985	0.2057	291

Adoptada de: Elaboración Propia

Decisión:

Del análisis realizado en la variación de distorsiones de entrepiso y aceleraciones de piso se establecen variaciones porcentuales de los resultados de base aislada con respecto a la base fija mayores al 200 %, por tanto se valida la hipótesis presentada.

Conclusiones.

5.1 Conclusiones.

De los resultados obtenidos en la presente investigación, se concluye que con el uso del criterio para la funcionalidad continua en el análisis sísmico de edificaciones esenciales como son los hospitales implementados con aisladores sísmicos de base, se logran, a nivel de diseño reducir los daños en la estructura, elementos no estructurales y sus componentes propensos a sufrir daños por desplazamiento lateral, logrando distorsiones de entrepiso menos del 0.3 %, además para proteger los elementos propensos a daños por aceleraciones alcanzando aceleraciones menores a 0.4g, cumpliéndose los parámetros de análisis para la funcionalidad continua desarrollada por Victor Zayas. Del proceso para alcanzar funcionalidad continua en la muestra de estudio, Hospital de Coracora, se determinan las siguientes conclusiones:

- Del análisis realizado en la estructura considerando que esta tiene base convencional o fija, los resultados obtenidos sobrepasan los límites que establece la funcionalidad continua, encontrando distorsiones promedio de entrepiso de hasta 0.0171, que en comparación al límite que es 0.003 existe una variación del 570 % con respecto al límite establecido es decir 5.7 veces el límite. Además las aceleraciones promedio máximas de piso obtenidas son de hasta 2.9177g, la cual supera al límite de 0.4 g en 728 % o 7.28 veces el límite. Teniendo estos resultados se concluye que es difícil que una estructura con base fija pueda llegar a cumplir los límites establecidos para la funcionalidad continua.
- La implementación del aislador sísmico de triple péndulo de fricción FPT 8827/14-12/10-66 en la estructura, mejora el desempeño de la misma, logrando alcanzar distorsiones promedio de entrepiso de hasta 0.0024 para propiedades límite superior (Upper Bound) y 0.0021 para propiedades límite inferior (Lower Bound), ambos



encontrándose dentro del límite establecido para la funcionalidad continua 0.003. Asimismo se encuentran aceleraciones promedio máximas de piso de 0.3937g y 0.2803g para propiedades límite superior e inferior respectivamente, estando también dentro del límite establecido 0.4g. Por lo que se concluye que la estructura aislada cumple con los límites establecidos para la funcionalidad continua.

- Debido a que la estructura aislada cumple con los requisitos establecidos para la funcionalidad continua concluimos que a nivel de diseño la muestra en estudio, Hospital de Coracora, cumple con la política establecida en el decreto supremo (*DS-027-2017-MINSA, 2017*), la misma que establece como meta “Reducir considerablemente los daños causados por los desastres en las infraestructuras vitales y la interrupción de los servicios básicos, como las instalaciones de salud y educativas”, además también se cumple con uno de los principios que establece la norma E030 2018, la cual indica que “las edificaciones esenciales tendrán consideraciones especiales orientadas a lograr que permanezcan en condiciones operativas luego de un sismo severo”.
- De la comparación de los desplazamientos horizontales de la estructura con base fija y base aislada se puede concluir, que la estructura aislada tiene un mejor comportamiento frente a los sismos debido a que los aisladores absorben en gran parte el movimiento que debería realizar la estructura, generándose así el desplazamiento mayor en los aisladores, reduciendo la fuerza sísmica de ingreso a la estructura, es por ello que se generan distorsiones de entrepiso muy pequeñas.
- El costo total de los aisladores representa un 4.6217% del costo directo total, representando un costo de S/ 1,819,785.00 soles, cuya consideración mejora notablemente el comportamiento de la estructura, por lo que justifica la inversión en los aisladores FPT 8827/14-12/10-6 ya que se estaría protegiendo toda la inversión que se hace en la estructura y sus componentes.

5.2 Recomendaciones.

- Se recomienda que para el diseño de edificaciones esenciales en las zonas sísmicas 3 y 4 del Perú se realice un diseño sísmico con los criterios de diseño para la funcionalidad continua, ya que debido a que establece límites más rigurosos de diseño como son, un factor de reducción sísmico $R=1$, distorsiones de entrepiso máximo de 0.003 y

aceleraciones de piso menores a 0.4, los daños pueda sufrir una edificación frente a un sismo severo, se reducen a daños no mayores al cosmético.

- Si se utilizan aisladores de base de tipo triple péndulo friccional, se recomienda que se verifique que, para propiedades límite superior (upper bound) el aislador se encuentre operando dentro del desplazamiento máximo establecido para la fase 3 de su movimiento, además para propiedades límite inferior (lower bound), el aislador no debe superar la capacidad máxima de desplazamiento del aislador, asegurándose así que el aislador este operable.
- Se recomienda que para la muestra de estudio hospital de Coracora, se garantice y se cumplan que las propiedades límite superior y límite inferior del aislador FPT 8827/14-12/10-6 definidas en la sección 3.9.9 de la presente tesis. Ya que si no se cumplen podría existir variación con respecto al diseño y desencadenando en algún riesgo de que el aislador pueda presentar errores en su correcto funcionamiento frente a un sismo severo.
- Se recomienda que se realice un proceso de contrucción adecuado, en la etapa de ejecución, ya que de esto depende que se cumplan los objetivos de como se va a desempeñar la edificación durante un sismo severo, para el cual ha sido diseñado.

5.3 Trabajos futuros.

Dentro de los trabajos futuros consideramos importante los siguientes:

- “Optimización del diseño de aisladores de triple péndulo friccional”.
Debido a que el diseño del aislador ahora es un diseño más experimental, se proyecta el estudio del diseño optimizado.
- “Estudio de la tecnología de materiales que componen el aislador de triple péndulo de fricción”.

En la actualidad el mayor productor de aisladores triple de péndulo de fricción es la empresa EPS (Earthquake Protection Systems) con su director Victor Zayas, quien ha patentado el aislador triple péndulo de fricción. Desarrollando el estudio de la tecnología de materiales que componen el aislador triple péndulo de fricción se podrían



producir también en nuestro país con la misma calidad, para tener alternativas de proveedores para contar con aisladores triple péndulo.

Referencias Bibliográficas

- DS-027-2017-MINSA. (2017). Decreto Supremo que aprueban Política Nacional de Hospitales Seguros Frente a los Desastres que Contiene el Plan de Acción 2017-2021. *MINISTERIO DE SALUD DEL PERÚ*. Recuperado desde <https://bit.ly/2xsLIEf>
- Aguiar, F. R. & Leyva, G. P. (2017). Análisis no Lineal del Aislador de Triple Péndulo de Fricción Mediante el Modelo Tri- Lineal. *Revista Ciencia Vol.19, 1, 95-119 (2017)*. *Departamento de Ciencias de la Tierra y la Construcción Universidad de Fuerzas Armadas ESPE*. Recuperado desde <https://bit.ly/2OKsqzs>
- Aguiar, R., Luis Almazán, J., Dechente, P. & Suárez, V. (2016). *Aisladores de base Elastoméricos y FPS* (1ra edicion electronica). Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. Recuperado desde <https://bit.ly/2QEj4DC>
- Almufti, I. & Willford, M. (2014). The Redi™ Rating System: A Framework To Implement Resilience-Based Earthquake Design For New Buildings. *Tenth U.S. National Conference on Earthquake Engineering - Frontiers of Earthquake Engineering, Anchorage, Alaska, July 21-25*. Recuperado desde <https://bit.ly/2pgg6ZB>
- ASCE. (2010). *Standard 7, Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures* (A. S. of Civil Engineers, Ed.). American Society of Civil Engineers.
- ASCE. (2016). *Standard 7, Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures* (A. S. of Civil Engineers, Ed.). American Society of Civil Engineers.
- Avila, B. L. H. (2006). *Introducción a la Metodología de la Investigación* (electrónica). eumed.net. Recuperado desde <http://bit.ly/2E4bDIV>
- El-Bayoumi, K. (2015). Modelling of Triple Friction Pendulum Bearing in SAP2000. *International Journal of Advances in Engineering & Technology-IJAET, 8, 1964-1971*. Recuperado desde <https://bit.ly/2ORItaV>
- Cango, P. A. D. (2018). *Diseño y Análisis de Edificaciones con Aisladores de Base tipo FPT* (MA. Thesis, Universidad de Cuenca - Ecuador).

- Casabonne, C. R. (2017). Actualidad de la Normativa Peruana. En *PRIMER SIMPOSIO INTERNACIONAL .Actualidad y Futuro de la Protección Sísmica en el Perú*. Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento. Recuperado desde <https://bit.ly/2PIngRm>
- CD50.R15. (2010). Plan de Acción de Hospitales Seguros. *Organizacion Panamericana de la Salud-Organizacion Mundial de la Salud Consejo-Directivo 50*. Recuperado desde <https://bit.ly/2xv2vRA>
- CDT & CCHC. (2012). Protección Sísmica de Estructuras "Sistemas de Aislación Sísmica y Disipación de Energía". *Documentos Técnicos CDT N°29 - Cooperación de Desarrollo Tecnológico - Cámara Chilena de la Construcción*. Corporación de Desarrollo Tecnológico - Cámara Chilena de la Construcción. Recuperado desde <https://bit.ly/2OdF3Tn>
- Constantinou, M. C. [M. C.], Kalpakidis, I., Filiatrault, A. & Ecker Lay, R. (2011). LRFD-Based Analysis and Design Procedures for Bridge Bearings and Seismic Isolators. Recuperado desde <http://mceer.buffalo.edu/pdf/report/11-0004.pdf>
- Constantinou, M. [M.C.], Whittaker, A., Kalpakidis, Y., Fenz, D. & G.P., W. (2007). Performance of Seismic Isolation Hardware under Service and Seismic Loading. Recuperado desde <http://mceer.buffalo.edu/pdf/report/07-0012.pdf>
- Constantinou, M. [Michael], Aguiar, R., Morales, E. & 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. *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, 21(1), 1-25. Recuperado desde <https://bit.ly/2ymQkHV>
- E020. (2006). *NORMA TECNICA E020 Cargas*. Ministerio de Vivienda Contrucción y Saneamiento - Regalmento Nacional de Edificaciones.
- E030. (2018). *NORMA TECNICA E030 "Diseño Sismorresistente"*. Aprobado con Resolución Ministerial N° 355-2018-Vivienda. Ministerio de Vivienda Contrucción y Saneamiento - Regalmento Nacional de Edificaciones. Recuperado desde <https://bit.ly/2SxIIei>
- EPS. (2017). Victor Zayas Resume. *Earthquake Protection Systems, Inc. (EPS)*. Recuperado desde <https://bit.ly/2xih4ZH>
- Fadi, F. & Constantinou, M. C. [Michael C.]. (2009). Evaluation of simplified methods of analysis for structures with triple friction pendulum isolators. *Earthquake Engineering And Structural Dynamics*. *Wiley InterScience*, 39, 5-22. Recuperado desde <https://bit.ly/2y7yuZk>

- FEMA. (2013). *FEMA P-58-1 Seismic Performance Assessment of Buildings Volume 1 - Methodology*. Federal Emergency Management Agency (FEMA). Recuperado desde <https://bit.ly/2pfoxUM>
- FEMA-451B. (2007). *NEHRP Recommended Provisions: Instructional Materials*. Federal Emergency Management Agency. Building Seismic Safety Council. Recuperado desde <https://bit.ly/2yx7S3s>
- Fenz, D. M. & Constantinou, M. C. [Michael C.]. (2008a). Development, Implementation and Verification of Dynamic Analysis Models for Multi-Spherical Sliding Bearings. Recuperado desde <http://mceer.buffalo.edu/pdf/report/08-0018.pdf>
- Fenz, D. M. & Constantinou, M. C. [Michael C.]. (2008b). Mechanical Behavior of Multi-Spherical Sliding Bearings. Recuperado desde <http://mceer.buffalo.edu/pdf/report/08-0007.pdf>
- Higashino, M. & Okamoto, S. (2006). *Response Control and Seismic Isolation of Buildings*. International Council for Research, Innovation in Building y Construction (CIB). Taylor & Francis Group.
- Housner, G. W. (1956). Limit design of structures to resist earthquakes. *Proceedings of the World Conference on Earthquake Engineering, Earthquake Engineering Research Center, Berkeley, California*.
- JPC. (2012). 30% of Apartments With Base Isolation Systems Suffered damage in Earthquake. *Japan Property Central. Japan Society of Seismic Isolation*. Recuperado desde <http://bit.ly/2E2okOn>
- Kitayama, S. & Constantinou, M. C. [Michael C.]. (2018). Seismic Performance Assessment of Seismically Isolated Buildings Designed by the Procedures of ASCE/SEI 7. Recuperado desde <http://mceer.buffalo.edu/pdf/report/18-0004.pdf>
- Mayes, R., Wetzel, N., Weaver, B., Tam, K., Parker, W., Brown, A. & Pietra, D. (2013). Performance Based Design of Buildings to Assess and Minimize Damage and Downtime and Implement a Rating System. *New Zealand Society For Earthquake Engineering*, 46(1), 40-55. Recuperado desde <https://bit.ly/2NkP9IW>
- McVitty, W. J. & Constantinou, M. C. [Michael C.]. (2015). Property Modification Factors for Seismic Isolators: Design Guidance for Buildings. Recuperado desde <http://mceer.buffalo.edu/pdf/report/15-0005.pdf>
- Miller, M. (2013). AISLADORES SÍSMICOS EN EDIFICACIONES. *Ingenicons.blogspot.com*. Recuperado desde <https://bit.ly/2MJzk2M>

- MINSA. (2011). *NORMA TECNICA DE SALUD Categorías de Establecimientos del Sector Salud*. NTS N° 021-MINSA- Aprobado con Resolución Ministerial N° 546-2011/MINSA. Ministerio de Salud-MINSA. Recuperado desde <https://bit.ly/2iSXHST>
- Moeindarbari, H. & Taghikhany, T. (2012). Optimum Design of Triple Friction Pendulum Bearing Subjected by Near-Field Ground Motions. En *The 15th World Conference on Earthquake Engineering (Lisbon, Portugal, 24-28 September)*. Recuperado desde <https://bit.ly/2OxUPW0>
- Morgan, T. A. & Mahin, S. A. (2011). *The Use of Base Isolation Systems to Achieve Complex Seismic Performance Objectives*. Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER). University of California, Berkeley.
- Muñoz, R. C. (2011). *Como elaborar y asesorar una investigación de tesis*. Pearson Education. Recuperado desde <https://bit.ly/2KcraDW>
- Oviedo, J. A. & Duque, M. d. P. (2006). Sistemas de control de respuesta sísmica en edificaciones. *Revista EIA (Escuela de Ingeniería de Antioquia)*, (6), 105-120. Recuperado desde <https://bit.ly/2NiRD4j>
- REDi™. (2013). *Design and Engineering Consultants, REDi Rating System: Resilience Based Earthquake Design Initiative for the Next Generation of Buildings*. Ibrahim Almufti, Michael Willford. ARUP. Recuperado desde <https://bit.ly/2MHOMwz>
- RNE. (2006). *Reglamento Nacional de Edificaciones*. Aprobado con Decreto Supremo N° 011-2006-Vivienda. Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento.
- Sarlis, A. A. S. & Constantinou, M. C. [M. C.]. (2010). Modeling Triple Friction Pendulum Isolators in Program SAP2000. *Technical Report released to the engineering community*. Recuperado desde <http://bit.ly/2yqXHNY>
- Seismosoft. (2018). Earthquake Engineering software solutions. SeismoMatch 2018 and SeismoSignal 2018. License Type: Academic License. Recuperado desde <https://www.seismosoft.com/>
- Terzic, V., Merrifield, S. K. & Mahin, S. A. (2012). Lifecycle Cost Comparisons for Different Structural systems designed for the same location. *Proceedings of the world conference of Earthquake Engineering, 15WCEE, Lisboa*. Recuperado desde <https://bit.ly/2Nn3Svw>
- Tipanluisa, V. E. M. (2017). *Análisis Sísmico no Lineal de Pórticos Planos con Aisladores Sísmicos Triple Péndulo de Fricción (TPF)* (MA. Thesis, Escuela Politécnica Nacional).

- Escuela de Posgrado en Ingeniería y Ciencias. Quito-Ecuador. Dirigido por, Dr. Roberto Aguiar Falconí).
- Toledo, E. V. (2015). Conferencia Online: Cálculo y Diseño Estructural de Edificios con Sótanos con Etabs y Sap2000. Aplicación de La Interacción Suelo-Estructura". Comunidad para la Ingeniería Civil. Recuperado desde <http://bit.ly/2SiE9U4>
- Zayas, V. [V.], Low, S. [S.] & Mahin, S. [S.]. (1990). A Simple Pendulum Technique for Acheiving Seismic Isolation. *Earthquake Spectra*, 6(2). Recuperado desde bit.ly/2IQy0Lc
- Zayas, V. [V.A.], Constantinou, M. [M.C.] & AI-Hussaini, T. (1994). *Seismic Isolation of Multi-Story Frame Structures Using Spherical Sliding Isolation Systems*. Technical Report NCEER-94-0007. National Center For Earthquake Engineering Research (NCEER). State University of New York at Buffalo.
- zayas, V. (2017). Estándar de Aislamiento Sísmico para la Funcionalidad Continua. *I Congreso Internacional de Estructuras de Edificación, Lima-Perú, 1 y 2 Abril*. Recuperado desde <https://bit.ly/2xkVOCm>
- Zayas, V. A. (2013). Seismic Isolation Design Criteria For Continued Functionality. *SEAOC 2013 Convention Proceedings, Structural Engineers Association of California, September 2013*. Recuperado desde <http://bit.ly/2IVJn4Q>
- Zayas, V. [Victor], Low, S. [Stanley] & Mahin, S. [Stephen]. (1987). The FPS Earthquake Resisting System Experimental Report. *Earthquake Engineering Research Center. University of California, Berkeley, California*.
- Zayas, V. [Victor], Mahin, S. [Stephen] & Constantinou, M. [Michael]. (2016). Safe and Unsafe Seismically Isolated Structures. Recuperado desde <http://bit.ly/2yDGmkA>

ANEXOS

A

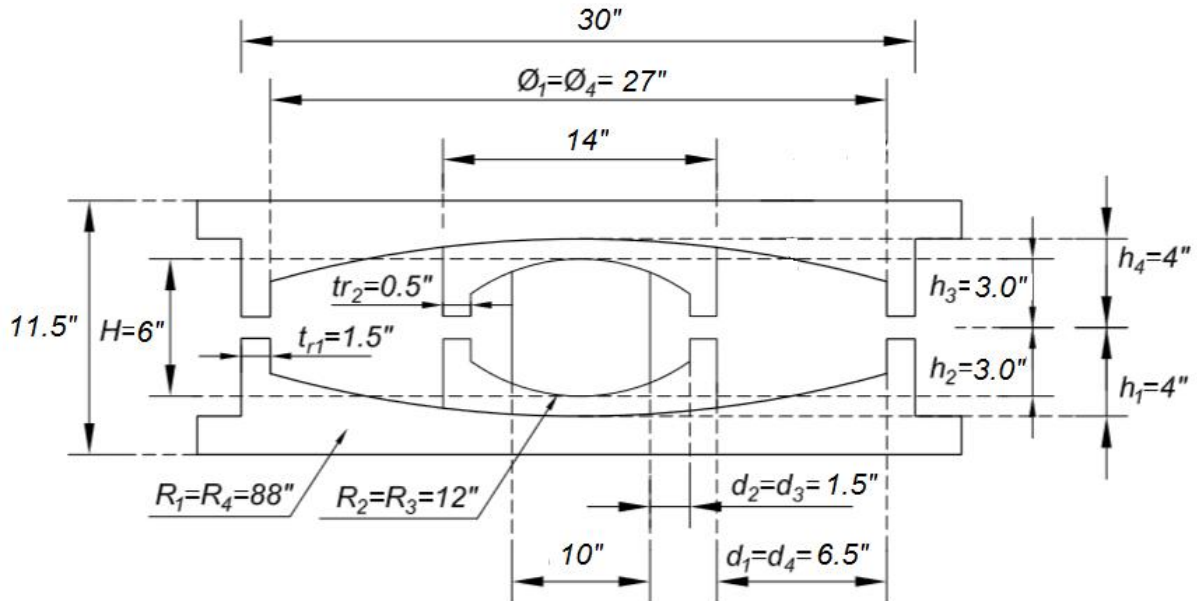
Memoria de cálculo desarrollado en Mathcad Prime V4.0.

- A.1 Fase III del deslizamiento para el aislador de triple péndulo de fricción.



1. FASE III DE DESLIZAMIENTO PARA EL AISLADOR DE TRIPLE PÉNDULO DE FRICCIÓN

Tenemos el aislador FPT como se muestra en la figura



Nomenclatura estandar: FPT 8827/14-12-/10-6

1.1 Propiedades Geométricas

$$\begin{array}{llll}
 R_1 := 88 & \text{in} & R_2 := 12 & \text{in} & R_3 := R_2 & R_4 := R_1 \\
 h_1 := 4.0 & \text{in} & h_2 := 3.0 & \text{in} & h_3 := h_2 & h_4 := h_1 \\
 d_1 := 6.5 & \text{in} & d_2 := 1.5 & \text{in} & d_3 := d_2 & d_4 := d_1
 \end{array}$$

Radio Efectivo:

$$\begin{array}{ll}
 R_{1eff} := R_1 - h_1 = 84 & \text{in} & R_{4eff} := R_{1eff} \\
 R_{2eff} := R_2 - h_2 = 9 & \text{in} & R_{3eff} := R_{2eff}
 \end{array}$$

Capacidad de desplazamiento actual:

$$\begin{array}{ll}
 d_{1a} := \frac{d_1 \cdot R_{1eff}}{R_1} = 6.205 & \text{in} & d_{4a} := d_{1a} \\
 d_{2a} := \frac{d_2 \cdot R_{2eff}}{R_2} = 1.125 & \text{in} & d_{3a} := d_{2a}
 \end{array}$$

1.2 Parametros de Fricción

Límite Inferior (Lower Bound):

$$\mu_{r1} := 3.0\%$$

Límite Superior (Upper Bound):

$$\mu_{r1} := 6.0\%$$

$$\begin{aligned}\mu_{L2} &:= 0.5\% \\ \mu_{L3} &:= 0.5\% \\ \mu_{L4} &:= 6.0\%\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\mu_{U2} &:= 2.0\% \\ \mu_{U3} &:= 2.0\% \\ \mu_{U4} &:= 8.0\%\end{aligned}$$

1.3 Información del Proyecto

$$\begin{aligned}W &:= 13556.40 \text{ Ton} \\ W_S &:= 11297 \text{ Ton}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}g &:= 386.4 \text{ in/s}^2 \\ S_{M1} &:= 0.6708 \text{ g}\end{aligned}$$

1.4 Fuerzas de Fricción

Límite Inferior (Lower Bound):

$$\begin{aligned}F_{f1L} &:= \mu_{L1} \cdot W = 0.03 \text{ W} \\ F_{f2L} &:= \mu_{L2} \cdot W = 0.005 \text{ W} \\ F_{f3L} &:= \mu_{L3} \cdot W = 0.005 \text{ W} \\ F_{f4L} &:= \mu_{L4} \cdot W = 0.06 \text{ W}\end{aligned}$$

Límite Superior (Upper Bound):

$$\begin{aligned}F_{f1U} &:= \mu_{U1} \cdot W = 0.06 \text{ W} \\ F_{f2U} &:= \mu_{U2} \cdot W = 0.02 \text{ W} \\ F_{f3U} &:= \mu_{U3} \cdot W = 0.02 \text{ W} \\ F_{f4U} &:= \mu_{U4} \cdot W = 0.08 \text{ W}\end{aligned}$$

1.5 Relación Fuerza Desplazamiento del Aislador

• Límite Superior (Upper Bound)

Fase I:

$$u_{1aU} := (\mu_{U1} - \mu_{U2}) \cdot R_{2eff} + (\mu_{U1} - \mu_{U3}) \cdot R_{3eff} = 0.72$$

$$F_{U1} := \frac{W}{R_{2eff} + R_{3eff}} \cdot u_{1aU} + \frac{F_{f2U} \cdot R_{2eff} + F_{f3U} \cdot R_{3eff}}{R_{2eff} + R_{3eff}} = 0.06 \text{ W}$$

Fase II:

$$u_{2aU} := u_{1aU} + (\mu_{U4} - \mu_{U1}) \cdot (R_{1eff} + R_{3eff}) = 2.58$$

$$F_{U2} := \frac{W}{R_{1eff} + R_{3eff}} \cdot u_{2aU} + \frac{F_{f1U} \cdot (R_{1eff} - R_{2eff}) + F_{f2U} \cdot R_{2eff} + F_{f3U} \cdot R_{3eff}}{R_{1eff} + R_{3eff}} = 0.08 \text{ W}$$

Fase III:

$$u_{dr1U} := u_{2aU} + d_{1a} \cdot \left(1 + \frac{R_{4eff}}{R_{1eff}}\right) - (\mu_{U4} - \mu_{U1}) \cdot (R_{1eff} + R_{4eff}) = 11.629$$

$$F_{U3} := \frac{W}{R_{1eff} + R_{4eff}} \cdot u_{dr1U} + \frac{F_{f1U} \cdot (R_{1eff} - R_{2eff}) + F_{f2U} \cdot R_{2eff} + F_{f3U} \cdot R_{3eff} + F_{f4U} \cdot (R_{4eff} - R_{3eff})}{R_{1eff} + R_{4eff}}$$

$$F_{U3} = 0.134 \text{ W}$$

Fase IV:

$$u_{dr4U} := u_{dr1U} + \left(\left(\frac{d_{4a}}{R_{4eff}} + \mu_{U4} \right) - \left(\frac{d_{1a}}{R_{1eff}} + \mu_{U1} \right) \right) \cdot (R_{2eff} + R_{4eff}) = 13.489$$

$$F_{U4} := \frac{W}{R_{2eff} + R_{4eff}} \cdot (u_{dr4U} - u_{dr1U}) + \frac{W}{R_{1eff}} \cdot d_{1a} + F_{f1U} = 0.154 \text{ W}$$

Fase V:

$$F_{U5} := \frac{W}{R_{2eff} + R_{3eff}} \cdot (u_{dr4U} - u_{dr1U}) + \frac{W}{R_{4eff}} \cdot u_{dr4U} + F_{f4U} = 0.344 \text{ W}$$

• **Límite Inferior (Lower Bound)**

Fase I:

$$u_{1a} := (\mu_{L1} - \mu_{L2}) \cdot R_{2eff} + (\mu_{L1} - \mu_{L3}) \cdot R_{3eff} = 0.45$$

$$F_{L1} := \frac{W}{R_{2eff} + R_{3eff}} \cdot u_{1a} + \frac{F_{f2L} \cdot R_{2eff} + F_{f3L} \cdot R_{3eff}}{R_{2eff} + R_{3eff}} = 0.03 \text{ W}$$

Fase II:

$$u_{2a} := u_{1a} + (\mu_{L4} - \mu_{L1}) \cdot (R_{1eff} + R_{3eff}) = 3.24$$

$$F_{L2} := \frac{W}{R_{1eff} + R_{3eff}} \cdot u_{2a} + \frac{F_{f1L} \cdot (R_{1eff} - R_{2eff}) + F_{f2L} \cdot R_{2eff} + F_{f3L} \cdot R_{3eff}}{R_{1eff} + R_{3eff}} = 0.06 \text{ W}$$

Fase III:

$$u_{dr1} := u_{2a} + d_{1a} \cdot \left(1 + \frac{R_{4eff}}{R_{1eff}}\right) - (\mu_{L4} - \mu_{L1}) \cdot (R_{1eff} + R_{4eff}) = 10.609$$

$$F_{L3} := \frac{W}{R_{1eff} + R_{4eff}} \cdot u_{dr1} + \frac{F_{f1L} \cdot (R_{1eff} - R_{2eff}) + F_{f2L} \cdot R_{2eff} + F_{f3L} \cdot R_{3eff} + F_{f4L} \cdot (R_{4eff} - R_{3eff})}{R_{1eff} + R_{4eff}}$$

$$F_{L3} = 0.104 \text{ W}$$

Fase IV:

$$u_{dr4} := u_{dr1} + \left(\left(\frac{d_{4a}}{R_{4eff}} + \mu_{L4} \right) - \left(\frac{d_{1a}}{R_{1eff}} + \mu_{L1} \right) \right) \cdot (R_{2eff} + R_{4eff}) = 13.399$$

$$F_{L4} := \frac{W}{R_{2eff} + R_{4eff}} \cdot (u_{dr4} - u_{dr1}) + \frac{W}{R_{1eff}} \cdot d_{1a} + F_{f1L} = 0.134 \text{ W}$$

Fase V:

$$F_{L5} := \frac{W}{R_{2eff} + R_{3eff}} \cdot (u_{dr4} - u_{dr1}) + \frac{W}{R_{4eff}} \cdot u_{dr4} + F_{f4L} = 0.375 \text{ W}$$

1.6 Diagrama de Histeresis del Aislador en Fase III para un desplazamiento Objetivo

$$D_M := 11.6$$

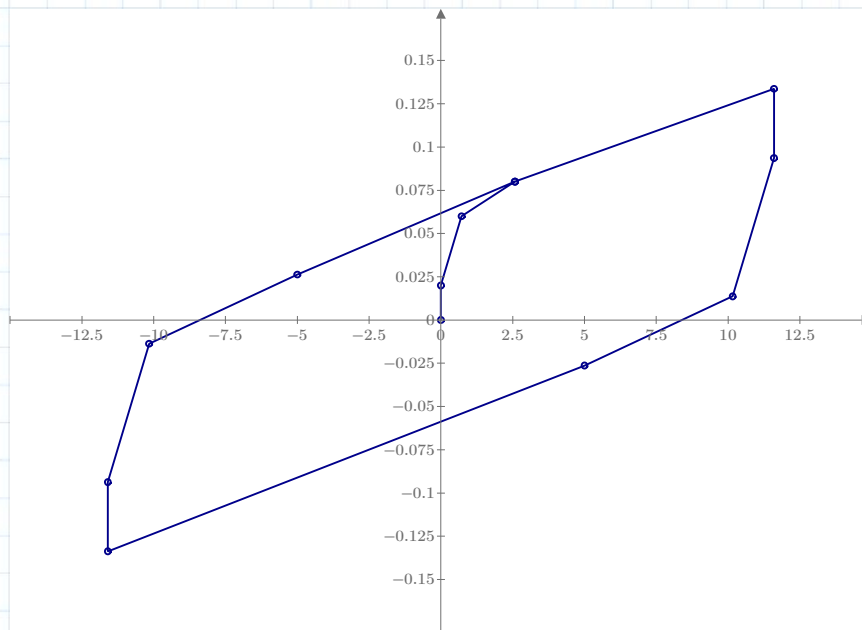
$$XX1 := \frac{2 F_{f1U} - 2 F_{f2U}}{W} \cdot (R_{2eff} + R_{3eff}) = 1.44$$

$$F_{U3DM} := \frac{W}{R_{1eff} + R_{4eff}} \cdot D_M + \frac{F_{f1U} \cdot (R_{1eff} - R_{2eff}) + F_{f2U} \cdot R_{2eff} + F_{f3U} \cdot R_{3eff} + F_{f4U} \cdot (R_{4eff} - R_{3eff})}{R_{1eff} + R_{4eff}} = 0.1337 W$$

$$UU := \begin{cases} f(w, z) \leftarrow 0 \\ UU \leftarrow \text{matrix}(13, 1, f) \\ UU_{1,1} \leftarrow 0 \\ UU_{2,1} \leftarrow 0 \\ UU_{3,1} \leftarrow u_{1aU} \\ UU_{4,1} \leftarrow u_{2aU} \\ UU_{5,1} \leftarrow D_M \\ UU_{6,1} \leftarrow D_M \\ UU_{7,1} \leftarrow D_M - XX1 \\ UU_{8,1} \leftarrow D_M - XX1 - 2 \cdot u_{2aU} \\ UU_{9,1} \leftarrow -D_M \\ UU_{10,1} \leftarrow -D_M \\ UU_{11,1} \leftarrow XX1 - D_M \\ UU_{12,1} \leftarrow XX1 + 2 \cdot u_{2aU} - D_M \\ UU_{13,1} \leftarrow u_{2aU} \\ UU \end{cases}$$

$$FF := \begin{cases} f(w, z) \leftarrow 0 \\ FF \leftarrow \text{matrix}(13, 1, f) \\ FF_{1,1} \leftarrow 0 \\ FF_{2,1} \leftarrow F_{f2U} \\ FF_{3,1} \leftarrow F_{U1} \\ FF_{4,1} \leftarrow F_{f4U} \\ FF_{5,1} \leftarrow F_{U3DM} \\ FF_{6,1} \leftarrow F_{U3DM} - 2 \cdot F_{f2U} \\ FF_{7,1} \leftarrow F_{U3DM} - 2 \cdot F_{f1U} \\ FF_{8,1} \leftarrow F_{U3DM} - 2 \cdot F_{f4U} \\ FF_{9,1} \leftarrow -F_{U3DM} \\ FF_{10,1} \leftarrow -F_{U3DM} + 2 \cdot F_{f2U} \\ FF_{11,1} \leftarrow -F_{U3DM} + 2 \cdot F_{f1U} \\ FF_{12,1} \leftarrow -F_{U3DM} + 2 \cdot F_{f4U} \\ FF_{13,1} \leftarrow F_{f4U} \\ FF \end{cases}$$

A. Diagrama de Histeresis en la Fase III Propiedades Upper Bound



• **Cálculo de Energía Disipada para Upper Bound**

La energía disipada viene dada por el área que encierra el ciclo de histeresis

$$E_{DU} := \left\| \begin{array}{l} f(w, z) \leftarrow 0 \\ ED \leftarrow \text{matrix}(10, 2, f) \\ \text{for } i \in 1, 2..10 \\ \left\| \begin{array}{l} ED_{i,1} \leftarrow UU_{14-i} \\ ED_{i,2} \leftarrow FF_{14-i} \end{array} \right\| \\ ED \end{array} \right\| \quad E_{DU} = \begin{bmatrix} 2.58 & 0.08 \text{ W} \\ -5 & 0.026 \text{ W} \\ -10.16 & -0.014 \text{ W} \\ -11.6 & -0.094 \text{ W} \\ -11.6 & -0.134 \text{ W} \\ 5 & -0.026 \text{ W} \\ 10.16 & 0.014 \text{ W} \\ 11.6 & 0.094 \text{ W} \\ 11.6 & 0.134 \text{ W} \\ 2.58 & 0.08 \text{ W} \end{bmatrix}$$

$$E_{DU'} := \frac{1}{2} \cdot \left(\sum_{i=1}^9 (E_{DU_{i,1}} \cdot E_{DU_{i+1,2}}) - \sum_{i=1}^9 (E_{DU_{i+1,1}} \cdot E_{DU_{i,2}}) \right)$$

$$E_{DU'} = 2.6051 \text{ W}$$

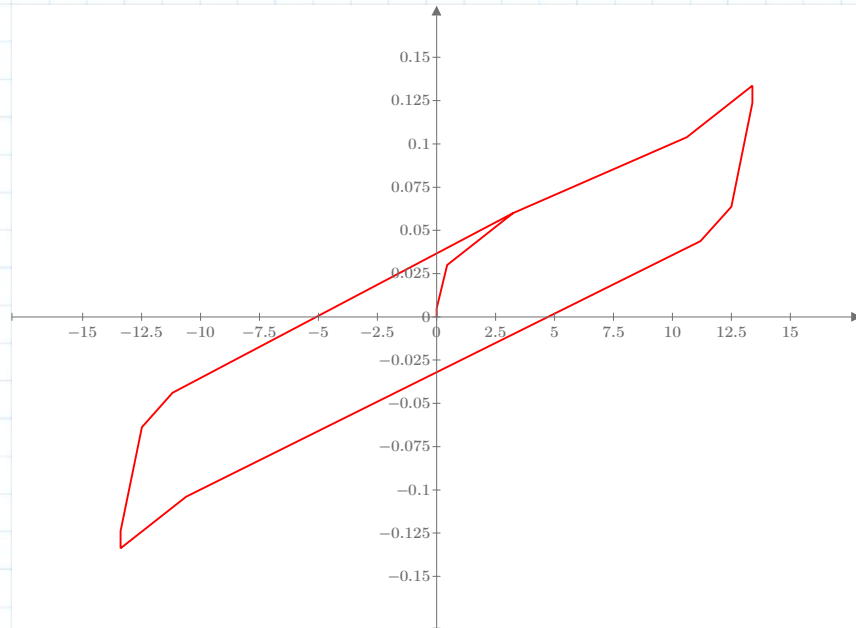
1.7 Fase de Deslizamiento IV para Propiedades Lower Bound

$$D_{ML'} := 13.39 \quad F_{dr1} := \frac{W}{R_{1eff}} \cdot d_{1a} + F_{f1L} = 0.104 \text{ W}$$

$$F_{LADM} := \frac{W}{R_{2eff} + R_{4eff}} \cdot (D_{ML'} - u_{dr1}) + \frac{W}{R_{1eff}} \cdot d_{1a} + F_{f1L} = 0.1338 \text{ W}$$

$$X_{1L} := \frac{F_{LADM} - 2 F_{f2L} - (F_{dr1} - 2 F_{f1L})}{W} \cdot (R_{2eff} + R_{3eff}) = 1.438$$

$$UL' := \left\| \begin{array}{l} f(w, z) \leftarrow 0 \\ UL' \leftarrow \text{matrix}(14, 1, f) \\ UL'_{1,1} \leftarrow 0 \\ UL'_{2,1} \leftarrow 0 \\ UL'_{3,1} \leftarrow u_{1a} \\ UL'_{4,1} \leftarrow u_{2a} \\ UL'_{5,1} \leftarrow u_{dr1} \\ UL'_{6,1} \leftarrow D_{ML'} \\ UL'_{7,1} \leftarrow D_{ML'} \\ UL'_{8,1} \leftarrow D_{ML'} - X_{1L} + 0.538 \\ UL'_{9,1} \leftarrow D_{ML'} - X_{1L} + 0.538 - 1.3 \\ UL'_{10,1} \leftarrow -u_{dr1} \\ UL'_{11,1} \leftarrow -D_{ML'} \\ UL'_{12,1} \leftarrow -D_{ML'} \\ UL'_{13,1} \leftarrow -D_{ML'} + X_{1L} - 0.538 \\ UL'_{14,1} \leftarrow -D_{ML'} + X_{1L} - 0.538 + 1.3 \\ UL'_{..} \leftarrow u_{2a} \end{array} \right\| \quad FL' := \left\| \begin{array}{l} f(w, z) \leftarrow 0 \\ FL' \leftarrow \text{matrix}(14, 1, f) \\ FL'_{1,1} \leftarrow 0 \\ FL'_{2,1} \leftarrow F_{f2L} \\ FL'_{3,1} \leftarrow F_{L1} \\ FL'_{4,1} \leftarrow F_{f4L} \\ FL'_{5,1} \leftarrow F_{dr1} \\ FL'_{6,1} \leftarrow F_{LADM} \\ FL'_{7,1} \leftarrow F_{LADM} - 2 \cdot F_{f2L} \\ FL'_{8,1} \leftarrow F_{LADM} - 2 F_{f2L} - 2 F_{f1L} \\ FL'_{9,1} \leftarrow F_{dr1} - 2 F_{f1L} \\ FL'_{10,1} \leftarrow -F_{dr1} \\ FL'_{11,1} \leftarrow -F_{LADM} \\ FL'_{12,1} \leftarrow -F_{LADM} + 2 \cdot F_{f2L} \\ FL'_{13,1} \leftarrow -F_{LADM} + 2 F_{f2L} + 2 F_{f1L} \\ FL'_{14,1} \leftarrow -F_{dr1} + 2 F_{f1L} \\ FL'_{..} \leftarrow F_{f4L} \end{array} \right\|$$



• Cálculo de Energía Disipada para Lower Bound

$$E_{DL'} := \left\| \begin{array}{l} f(w, z) \leftarrow 0 \\ EL' \leftarrow \text{matrix}(12, 2, f) \\ \text{for } i \in 1, 2..12 \\ \left\| \begin{array}{l} EL'_{i,1} \leftarrow UL'_{16-i} \\ EL'_{i,2} \leftarrow FL'_{16-i} \end{array} \right\| \\ EL' \end{array} \right\| \quad E_{DL'} = \begin{bmatrix} 3.24 & 0.06 \text{ W} \\ -11.19 & -0.044 \text{ W} \\ -12.49 & -0.064 \text{ W} \\ -13.39 & -0.124 \text{ W} \\ -13.39 & -0.134 \text{ W} \\ -10.609 & -0.104 \text{ W} \\ 11.19 & 0.044 \text{ W} \\ 12.49 & 0.064 \text{ W} \\ 13.39 & 0.124 \text{ W} \\ 13.39 & 0.134 \text{ W} \\ 10.609 & 0.104 \text{ W} \\ 3.24 & 0.06 \text{ W} \end{bmatrix}$$

$$E_{DL'} := \frac{1}{2} \cdot \left(\sum_{i=1}^{11} (E_{DL'_{i,1}} \cdot E_{DL'_{i+1,2}}) - \sum_{i=1}^{11} (E_{DL'_{i+1,1}} \cdot E_{DL'_{i,2}}) \right)$$

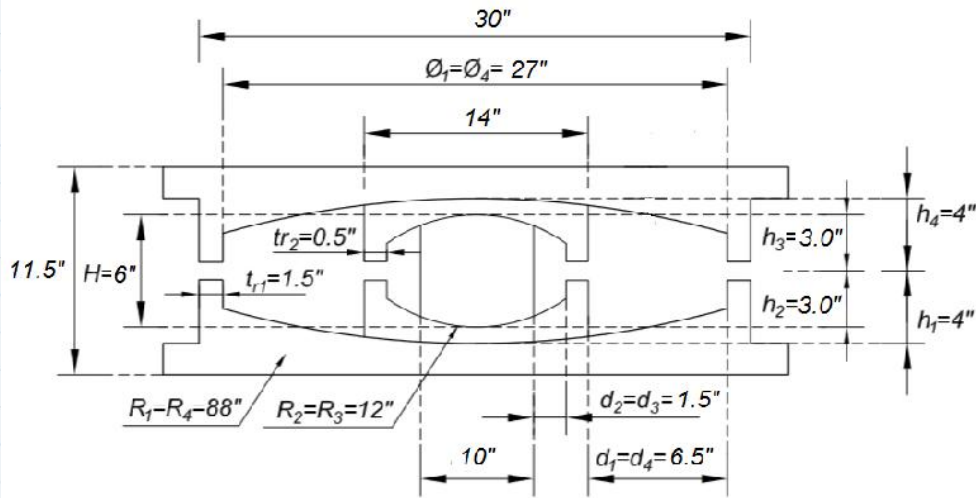
$$E_{DL'} = 1.7262 \text{ W}$$



A.2 Análisis de fuerza lateral equivalente.

1. ANALISIS DE FUERZA LATERAL EQUIVALENTE CORACORA

Tenemos el aislador FPT 8827/14-12/10-6, como se muestra en la figura



1.1 Propiedades Geométricas

$$\begin{array}{llll}
 R_1 := 88 & \text{in} & R_2 := 12 & \text{in} & R_3 := R_2 & R_4 := R_1 \\
 h_1 := 4.0 & \text{in} & h_2 := 3.0 & \text{in} & h_3 := h_2 & h_4 := h_1 \\
 d_1 := 6.5 & \text{in} & d_2 := 1.5 & \text{in} & d_3 := d_2 & d_4 := d_1
 \end{array}$$

Radio Efectivo:

$$\begin{array}{ll}
 R_{1eff} := R_1 - h_1 = 84 & \text{in} & R_{4eff} := R_{1eff} \\
 R_{2eff} := R_2 - h_2 = 9 & \text{in} & R_{3eff} := R_{2eff}
 \end{array}$$

Capacidad de desplazamiento actual:

$$\begin{array}{ll}
 d_{1a} := \frac{d_1 \cdot R_{1eff}}{R_1} = 6.205 & \text{in} & d_{4a} := d_{1a} & F_{res} := \frac{11.6}{2 \cdot (R_{1eff} + R_{2eff})} = 0.062 \text{ W} \\
 d_{2a} := \frac{d_2 \cdot R_{2eff}}{R_2} = 1.125 & \text{in} & d_{3a} := d_{2a}
 \end{array}$$

1.2 Parametros de Fricción

Límite Inferior (Lower Bound):

$$\begin{array}{l}
 \mu_{L1} := 3.0\% \\
 \mu_{L2} := 0.5\% \\
 \mu_{L3} := 0.5\% \\
 \mu_{L4} := 6.0\%
 \end{array}$$

Límite Superior (Upper Bound):

$$\begin{array}{l}
 \mu_{U1} := 6.0\% \\
 \mu_{U2} := 2.0\% \\
 \mu_{U3} := 2.0\% \\
 \mu_{U4} := 8.0\%
 \end{array}$$



1.3 Información del Proyecto

$$W := 13556.40 \text{ Ton}$$

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

$$W_S := 11297 \text{ Ton}$$

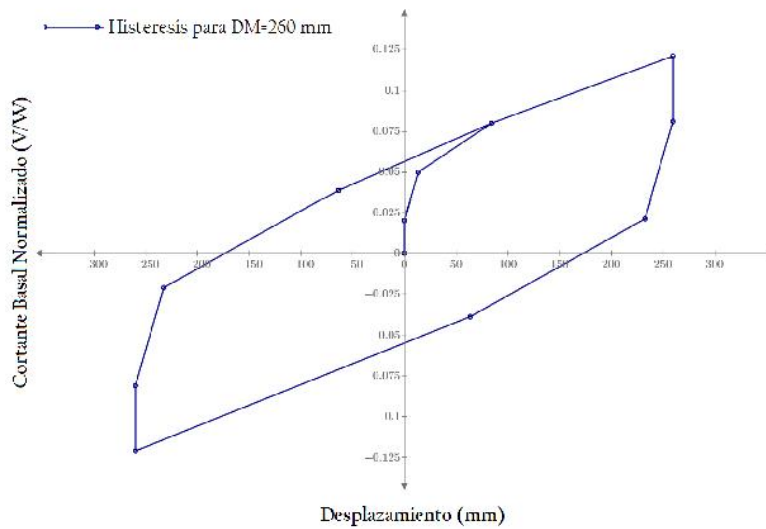
$$S_{M1} := 0.6708 \text{ g}$$

1.4 Cálculo del Desplazamiento Máximo DM

- Para Propiedades Upper Bound

1) Asumimos que el desplazamiento inicial : $D_M := 10.5 \text{ in}$

- 2) Verificamos que con este desplazamiento asumido, el aislador opere en la fase III:



Al identificar los desplazamientos límites para las propiedades del aislador obtenemos que u_{dr1} y u_{dr4} tienen como valores a 11.629 in y 13.489 in respectivamente.

- 3) Calculamos la Cortante V_M

Debido a que el sistema se encuentra operando en la Fase III, la fuerza cortante viene dada por la ecuación para la fuerza horizontal de la misma fase, con la cual obtenemos.

$$V_M := 0.1271 W = 0.127 W$$

- 4) Calculamos la Rigidez Efectiva K_M

$$K_M := \frac{V_M}{D_M} = 0.0121 W / \text{in}$$

- 5) Calculamos el Periodo Efectivo T_M

$$T_M := 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{W}{K_M \cdot g}} = 2.906$$



6) Calculamos el Amortiguamiento Efectivo β_M

Para este cálculo se requiere la energía disipada que es el área que encierra el diagrama de histeresis mostrado cuyo cálculo nos da:

$$E_M := 2.3349 \cdot W = 2.335 W \quad 4.324$$

$$\beta_M := \frac{E_M}{2 \cdot \pi \cdot K_M \cdot D_M^2} = 0.278$$

7) Factor de reducción de la amortiguación B_M

$$B_M := \left(\frac{\beta_M}{0.05} \right)^{0.3} = 1.674$$

8) Desplazamiento Máximo D_M

$$D_M := \frac{g \cdot S_{M1} \cdot T_M}{4 \cdot \pi^2 \cdot B_M} = 11.392$$

9) Cálculo del error para D_M

$$\text{Error} := \begin{cases} \text{if } D_{M'} - D_M > 0.2 \\ \quad \text{“No Cumple”} \\ \text{else} \\ \quad \text{“Aceptable”} \end{cases} \quad \text{Error} = \text{“No Cumple”}$$

Luego de realizar iteraciones se encuentra que el valor aceptable de D_M es 12.30; para el cual se tienen los siguientes calculos:

$$D_{M''} := 11.6$$

$$V_{M'} := 0.1337 W$$

$$K_{M'} := \frac{V_{M'}}{D_{M'}} = 0.01174 W / in$$

$$T_{M'} := 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{W}{K_{M'} \cdot g}} = 2.951$$

$$E_{M'} := 2.6051 \cdot W$$

$$\beta_{M'} := \frac{E_{M'}}{2 \cdot \pi \cdot K_{M'} \cdot D_{M''}^2} = 0.263$$

$$B_{M'} := \left(\frac{\beta_{M'}}{0.05} \right)^{0.3} = 1.645$$

$$D_{M'''} := \frac{g \cdot S_{M1} \cdot T_{M'}}{4 \cdot \pi^2 \cdot B_{M'}} = 11.776 \quad in$$

$$\text{Error} := \begin{cases} \text{if } D_{M'''} - D_{M''} > 0.2 \\ \quad \text{“No Cumple”} \\ \text{else} \\ \quad \text{“Aceptable”} \end{cases} \quad \text{Error} = \text{“Aceptable”}$$

• Para Propiedades Lower Bound

De manera similar realizamos los cálculos como sigue:

$$D_{ML} := 13.39$$

$$V_{ML} := 0.1338 \text{ W}$$

$$K_{ML} := \frac{V_{ML}}{D_{ML}} = 0.00999 \text{ W /in}$$

$$T_{ML} := 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{W}{K_M \cdot g}} = 2.906$$

$$E_{ML} := 1.7262 \cdot W = 1.726 \text{ W}$$

$$\beta_{ML} := \frac{E_{ML}}{2 \cdot \pi \cdot K_{ML} \cdot D_{ML}^2} = 0.153$$

$$B_{ML} := \left(\frac{\beta_{ML}}{0.05} \right)^{0.3} = 1.4$$

$$D_{ML} := \frac{g \cdot S_{M1} \cdot T_{ML}}{4 \cdot \pi^2 \cdot B_{ML}} = 13.625 \text{ in}$$

1.4 Desplazamiento y Cortante Basal de Diseño

Apartir de los cálculos desarrollados para el límite superior (Upper Bound) y el límite inferior (Lower Bound) establecemos los desplazamiento máximos y Fuerzas de diseño, los cuales se usan para el control de resultados en el análisis de respuesta en el tiempo:

• Desplazamiento Máximo y Desplazamiento Total Máximo

-Desplazamiento máximo D_M

$$D_M := D_{M'} = 11.6 \text{ in}$$

$$D_{ML} := D_{ML} = 13.39$$

-Desplazamiento total máximo D_{TM}

$$D_{TM} := 1.5 \cdot D_{M'} = 17.4 \text{ in}$$

$$D_{TML} := 1.5 \cdot D_{ML} = 20.085$$

• Fuerzas Cortantes

-Cortante Basal para el sistema de aislacion y los elementos estructurales bajo el nivel de la base V_b

Upper Bound

Lower Bound

$$V_{bU} := K_{M'} \cdot D_{M'} = 0.1337 \text{ W}$$

$$V_{bL} := K_{ML} \cdot D_{ML} = 0.1338 \text{ W}$$

-Cortante Basal para elementos estructurales que se encuentran por encima del nivel de la base V_s

$$W_S := 11297$$

$$W' := 13556.40$$

$$R_I := 1.5$$

Upper Bound

Lower Bound

$$V_{stU} := V_{bU} \cdot \left(\frac{W_S}{W'} \right)^{1-2.5 \cdot \beta_{M'}} = 0.1256 \text{ W}$$

$$V_{stL} := V_{bL} \cdot \left(\frac{W_S}{W'} \right)^{1-2.5 \cdot \beta_{ML}} = 0.1196 \text{ W}$$

$$V_{sU} := \frac{V_{stU}}{R_I} = 0.0837 \text{ W}$$

$$V_{sL} := \frac{V_{stL}}{R_I} = 0.0797 \text{ W}$$

• Límites establecidos para V_s Sección 17.5.4.3 del ASCE7-16

(1) La fuerza lateral requerida por la Sección 12.8 del ASCE7-16 para una estructura empotrada asociada con un carga sísmica, f_{τ} , y un periodo igual al periodo aislador, T_{M_UB} .

$$T_{M_UB} := T_M = 2.906$$

$$R := 6 \quad S_{DS} := 1.0$$

$$I := 1$$

$$W_s := W_S$$

$$I_e := 1$$

$$S_{D1} := 0.6708$$

-Cálculo de C_s

$$C_s := \frac{S_{DS}}{\frac{R}{I_e}} = 0.167$$

- C_s no debe exceder

- C_s no debe menor que

$$C_{s1} := \frac{S_{D1}}{T_{M_UB} \cdot \left(\frac{R}{I_e}\right)} = 0.038$$

$$C_{s2} := 0.044 \cdot S_{DS} \cdot I_e = 0.044$$

-Para $S_{D1} \geq 0.6 g$, C_s no debe menor que

$$C_{s3} := \frac{0.5 \cdot S_{D1}}{\left(\frac{R}{I_e}\right)} = 0.056$$

-Bajo estas condiciones seleccionamos C_{s3} , entonces

$$V_c := C_{s3} \cdot W_s = 631.502 = 0.075 W_s$$

(2) La fuerza lateral f_{τ} , calculado usando la Ecuación (C17.5.7) con f_{τ} igual a la fuerza requerida para activar completamente el sistema de aislación, usando las propiedades más altas de Upper Bound

-La fuerza requerida para activar completamente el sistema de aislacion es la fuerza en la Fase II de deslizamiento.

$$V_{bFII} := 0.08 \cdot W' = 1084.512$$

$$V_{stc} := V_{bFII} \cdot \left(\frac{W_S}{W'}\right)^{1-2.5 \cdot \beta_M} = 1026.063 = 0.076 W$$

$$V_{sc} := V_{stc} = 1026.063$$

(3) 1.5 veces las propiedades nominales

-Consideramos que el efecto de ablandamiento se produce para $\mu = 0.055$

$$V_{sc3} := 1.5 \cdot 0.055 \cdot W' = 1118.403 = 0.083 W$$

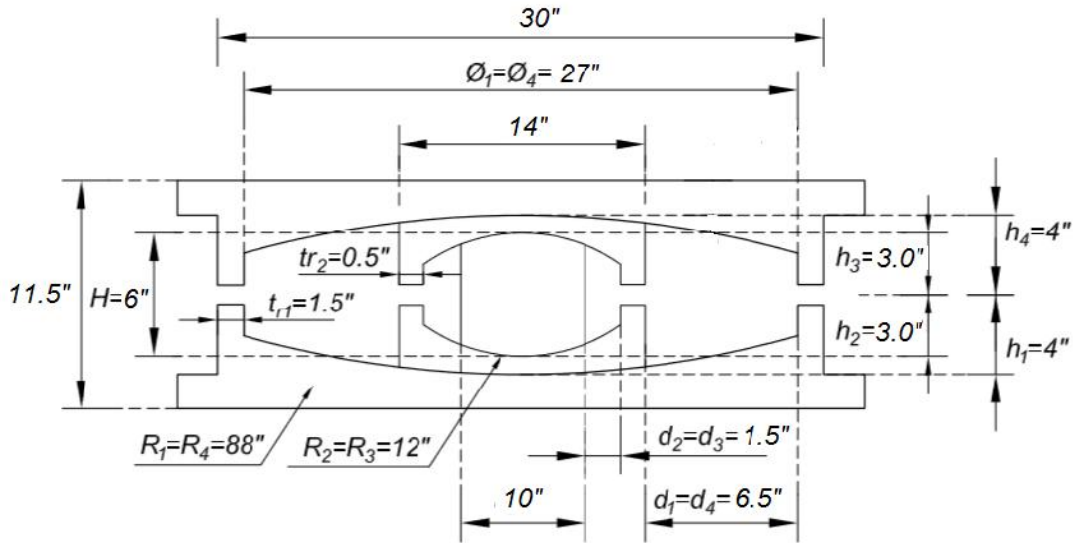


A.3 Cálculo de las propiedades Link/Support FPT 8827/14-12/10-6.



PROPIEDADES DEL ELEMENTO TIPO LINK/SUPPORT ETABS PARA EL AISLADOR FPT 8827/14-12/10-6

Tenemos el aislador FPT como se muestra en la figura



1. Propiedades del aislador FTP

1.1 Propiedades Geométricas

$$\begin{array}{llll}
 R_1 := 88 & \text{in} & R_2 := 12 & \text{in} & R_3 := R_2 & R_4 := R_1 \\
 h_1 := 4.0 & \text{in} & h_2 := 3.0 & \text{in} & h_3 := h_2 & h_4 := h_1 \\
 d_1 := 6.5 & \text{in} & d_2 := 1.5 & \text{in} & d_3 := d_2 & d_4 := d_1
 \end{array}$$

Radio Efectivo:

$$\begin{array}{ll}
 R_{1eff} := R_1 - h_1 = 84 & \text{in} & R_{4eff} := R_{1eff} \\
 R_{2eff} := R_2 - h_2 = 9 & \text{in} & R_{3eff} := R_{2eff}
 \end{array}$$

Capacidad de desplazamiento actual:

$$\begin{array}{ll}
 d_{1a} := \frac{d_1 \cdot R_{1eff}}{R_1} = 6.205 & \text{in} & d_{4a} := d_{1a} \\
 d_{2a} := \frac{d_2 \cdot R_{2eff}}{R_2} = 1.125 & \text{in} & d_{3a} := d_{2a}
 \end{array}$$

1.2 Parametros de Fricción

Límite Inferior (Lower Bound):

$$\begin{array}{l}
 \mu_{L1} := 3.0\% \\
 \mu_{L2} := 0.5\% \\
 \mu_{L3} := 0.5\% \\
 \mu_{L4} := 6.0\%
 \end{array}$$

Límite Superior (Upper Bound):

$$\begin{array}{l}
 \mu_{U1} := 6.0\% \\
 \mu_{U2} := 2.0\% \\
 \mu_{U3} := 2.0\% \\
 \mu_{U4} := 8.0\%
 \end{array}$$



1.3 Información del Proyecto

$$W := 13556.40 \text{ Ton} \quad g := 9.81 \quad m/s^2$$

$$W_S := 11297 \text{ Ton}$$

$$N_{ais} := 66 \text{ Und}$$

$$W_i := \frac{W}{N_{ais}} = 205.4 \text{ Ton}$$

$$D_M := 11.6 \cdot 0.0254 = 0.295 \text{ m}$$

$$D_{ML} := 13.39 \cdot 0.0254 = 0.34 \text{ m}$$

2. Cálculo de propiedades link/support

2.1 Propiedades Principales

2.1.1 Inercia Rotacional

Consideramos que la superficie de contacto del deslizador rígido como diametro del aislador D_a con una altura total del aislador h_T y asumiendo un modulo de elasticidad E_a para cada aislador. Entonces tenemos:

$$D_a := 14 \cdot 0.0254 - (d_2 + 0.5) \cdot 2 \cdot 0.0254 = 0.254 \text{ m}$$

$$E_a := 2.1 \cdot 10^7 \text{ Ton/m}^2 \quad h_T := 11.5 \cdot 0.0254 = 0.292 \text{ m}$$

• Área de la sección transversal:

$$A_a := \frac{\pi \cdot D_a^2}{4} = 0.0507 \text{ m}^2$$

• Fuerza en el desplazamiento cero dividida por la carga normal “ μ ”:

Límite superior (Upper Bound):

Límite Inferior (Lower Bound):

$$\mu_{UB} := \mu_{U4} - \left((\mu_{U4} - \mu_{U2}) \cdot \frac{R_{2eff}}{R_{1eff}} \right) = 0.074 \quad \mu_{LB} := \mu_{L4} - \left((\mu_{L4} - \mu_{L2}) \cdot \frac{R_{2eff}}{R_{1eff}} \right) = 0.054$$

• Inercia Rotacional (Rotational Inertia):

Límite superior (Upper Bound):

Límite Inferior (Lower Bound):

$$K_{eff} := \frac{W_i}{R_{1eff}} + \frac{\mu_{UB} \cdot W_i}{D_M} = 53.733 \quad K_{effL} := \frac{W_i}{R_{1eff}} + \frac{\mu_{LB} \cdot W_i}{D_{ML}} = 35.122 \text{ Ton/m}$$

$$I := \frac{K_{eff} \cdot h_T^3}{12 \cdot E_a} = 5.314 \cdot 10^{-9}$$

$$I := \frac{K_{effL} \cdot h_T^3}{12 \cdot E_a} = 3.474 \cdot 10^{-9} \text{ m}^4$$

2.1.1 Masa del aislador

Consideramos que la masa es igual para Upper Bound y Lower Bound :

$$D_p := 2 \cdot D_M = 0.589 \text{ m} \quad \text{Correlación tamaño/peso del aislador}$$

$$W_{ai} := \frac{1}{2.2046} \left(0.241 \cdot (3.2808 \cdot D_p)^2 - 0.0564 \cdot (3.2808 \cdot D_p) \right) = 0.35913 \text{ Ton}$$



$$M := \frac{W_{ai}}{9.81} = 0.03661 \quad \text{Ton.Seg}^2/m$$

2.2 Propiedades Direccionales U1

- **Rigidez Efectiva (effective stiffness):**
(igual para Upper Bound y Lower Bound)

$$R_E := \frac{A_a \cdot E_a}{h_T} = 3642881.568 \quad \text{Ton/m}$$

- **Amortiguamiento Efectivo (effective stiffness):**

este amortiguamiento calculado tiene como valor:

Límite superior (Upper Bound):

Límite Inferior (Lower Bound):

$$\beta_E := 26.3\%$$

$$\beta_{EL} := 15.30\%$$

2.3 Propiedades Direccionales U2 y U3

2.3.1 Determinación de las propiedades lineales

- Rigidez Efectiva (effective stiffness), Calculado en 2.1:

Límite superior (Upper Bound):

$$53.733 \quad \text{Ton/m}$$

Límite Inferior (Lower Bound):

$$35.122 \quad \text{Ton/m}$$

- Amortiguamiento Efectivo (effective damping):

Límite superior (Upper Bound):

$$26.30\%$$

Límite Inferior (Lower Bound):

$$15.30\%$$

- Altura para la superficie exterior (Height for outer surface) $h_1 = h_4$: **0.102** m

(igual para Upper Bound y Lower Bound)

- Altura para la superficie interior (Height for inn surface) $h_2 = h_3$: **0.076** m

(igual para Upper Bound y Lower Bound)

2.3.2 Determinación de las propiedades no lineales

- Desplazamiento de Fluencia:

Límite superior (Upper Bound):

$$D_Y := (\mu_{U4} - \mu_{U2}) \cdot R_{2eff} \cdot 0.0254 = 0.01372$$

(este valor se puede asumir 0.04)

Límite Inferior (Lower Bound):

$$D_{YL} := (\mu_{L4} - \mu_{L2}) \cdot R_{2eff} \cdot 0.0254 = 0.01257 \quad m$$

- Rigidez de la superficie exterior superior (stiffness of outer surface):

Límite superior (Upper Bound):

$$\frac{\mu_{U4} \cdot W_i}{D_Y} = 1198.017 \quad \text{Ton/m}$$

Límite Inferior (Lower Bound):

$$\frac{\mu_{L4} \cdot W_i}{D_{YL}} = 980.196 \quad \text{Ton/m}$$

- Rigidez de la superficie exterior inferior (stiffness of outer surface):

Límite superior (Upper Bound):

$$\frac{\mu_{U1} \cdot W_i}{D_Y} = 898.513 \quad \text{Ton/m}$$

Límite Inferior (Lower Bound):

$$\frac{\mu_{L1} \cdot W_i}{D_{YL}} = 490.098 \quad \text{Ton/m}$$

- Rigidez de la superficie interior (stiffness of inner surface):

Límite superior (Upper Bound):

$$\frac{\mu_{U2} \cdot W_i}{D_Y} = 299.504 \quad \text{Ton/m}$$

Límite Inferior (Lower Bound):

$$\frac{\mu_{L2} \cdot W_i}{D_{YL}} = 81.683 \quad \text{Ton/m}$$

- Coeficiente de Fricción Lento (Friction co. Slaw)

Límite superior (UB):

Límite Inferior (LB):

- | | | |
|---------------------------------|-------------------|--------------------|
| • superficie exterior superior: | $\mu_{U4} = 0.08$ | $\mu_{L4} = 0.06$ |
| • superficie exterior inferior: | $\mu_{U1} = 0.06$ | $\mu_{L1} = 0.03$ |
| • superficie interior: | $\mu_{U2} = 0.02$ | $\mu_{L2} = 0.005$ |

- Coeficiente de Fricción Rápido (Friction co. Fast)

Límite superior (UB):

Límite Inferior (LB):

- | | | |
|---------------------------------|---------------------------|---------------------------|
| • superficie exterior superior: | $2 \cdot \mu_{U4} = 0.16$ | $2 \cdot \mu_{L4} = 0.12$ |
| • superficie exterior inferior: | $2 \cdot \mu_{U1} = 0.12$ | $2 \cdot \mu_{L1} = 0.06$ |
| • superficie interior: | $2 \cdot \mu_{U2} = 0.04$ | $2 \cdot \mu_{L2} = 0.01$ |

- Parámetro de Velocidad (Rate Parameter), Friction co. Slaw / Friction co. Fast : 0.5
(igual para Upper Bound y Lower Bound)

- Radio de Superficie deslizante:

(igual para Upper Bound y Lower Bound)

- | | | |
|---------------------------------|---------------------------------|----------|
| • superficie exterior superior: | $R_{4eff} \cdot 0.0254 = 2.134$ | <i>m</i> |
| • superficie exterior inferior: | $R_{1eff} \cdot 0.0254 = 2.134$ | <i>m</i> |
| • superficie interior: | $R_{2eff} \cdot 0.0254 = 0.229$ | <i>m</i> |

- Distancia de Parada (Stop Distance):

Límite superior (Upper Bound):

- | | | |
|---------------------------------|---|----------|
| • superficie exterior superior: | $2 \cdot D_Y + 2 \cdot d_{1a} \cdot 0.0254 = 0.343$ | <i>m</i> |
| • superficie exterior inferior: | $2 \cdot D_Y + 2 \cdot d_{1a} \cdot 0.0254 = 0.343$ | <i>m</i> |
| • superficie interior: | $2 \cdot D_Y = 0.02743$ | <i>m</i> |

Límite Inferior (Lower Bound):

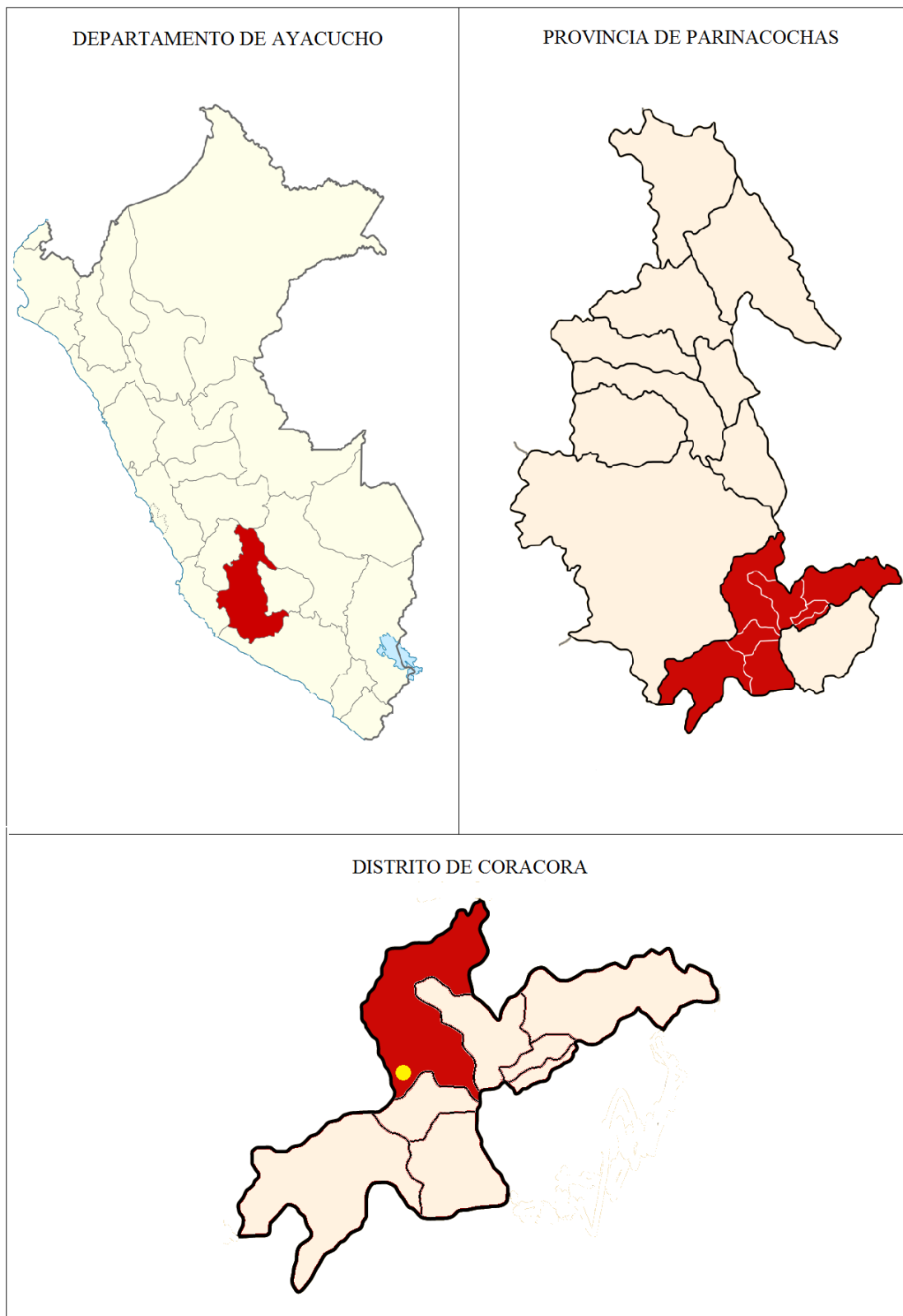
- | | | |
|---------------------------------|---|----------|
| • superficie exterior superior: | $2 \cdot D_{YL} + 2 \cdot d_{1a} \cdot 0.0254 = 0.34$ | <i>m</i> |
| • superficie exterior inferior: | $2 \cdot D_{YL} + 2 \cdot d_{1a} \cdot 0.0254 = 0.34$ | <i>m</i> |
| • superficie interior: | $2 \cdot D_{YL} = 0.02515$ | <i>m</i> |

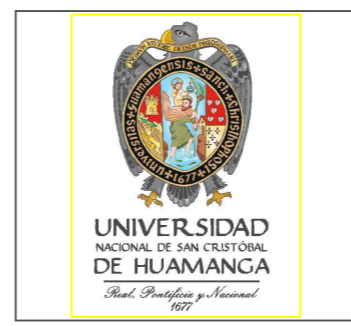
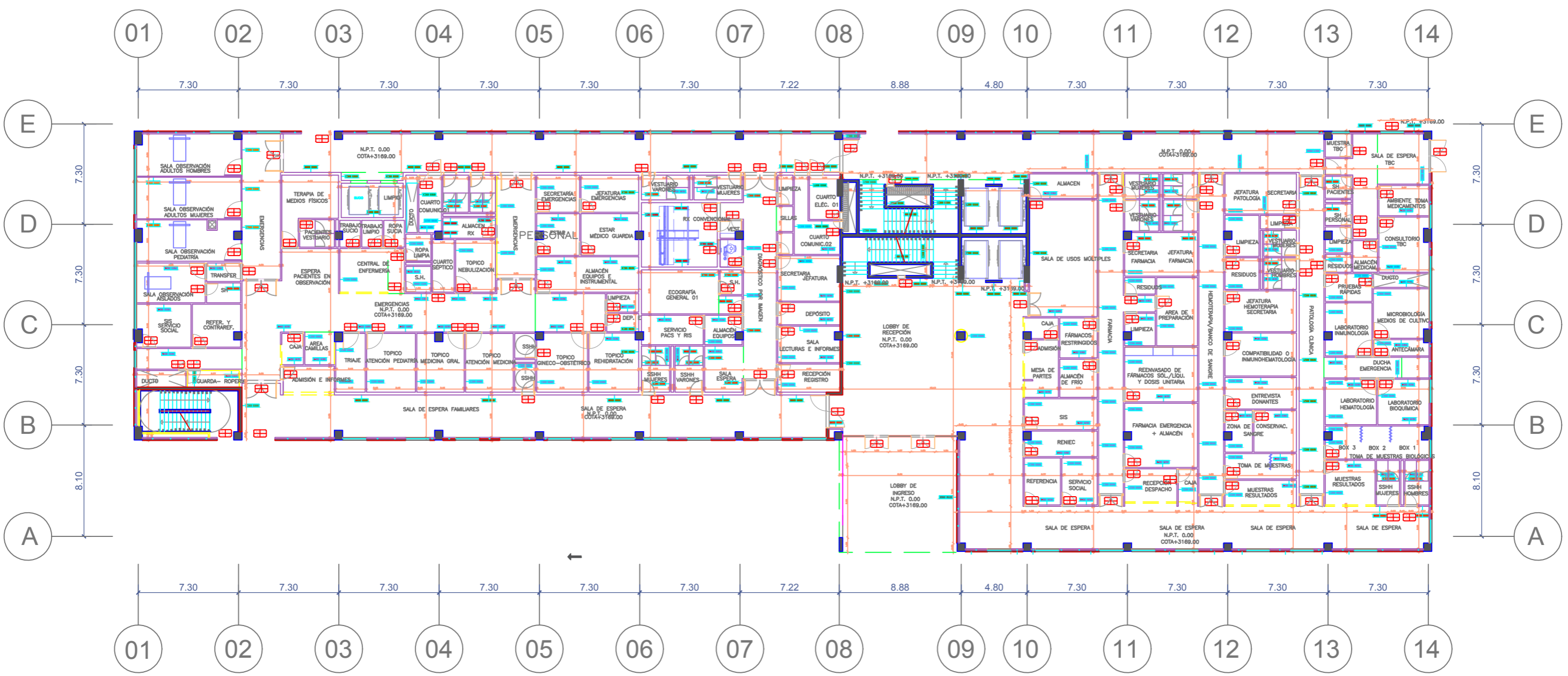
Anexo

B

Planos de la muestra Hospital de Coracora ubicado en el distrito de Coracora, Provincia de Prinacochas, Departamento de Ayacucho.

UBICACIÓN DEL HOSPITAL DE CORACORA





UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA

PROYECTO:
MEJORAMIENTO DE LA CAPACIDAD RESOLUTIVA DE LA UNIDAD PRODUCTORA DE LOS SERVICIOS DE SALUD DEL HOSPITAL CORACORA – DISTRITO DE CORACORA – PROVINCIA DE PARINACOCNAS, REGIÓN AYACUCHO

PLANO:
PLANTA DISTRIBUCIÓN, TABIQUES Y CARPINTERÍA

UBICACIÓN: LOCALIDAD : CORACORA PROVINCIA : PARINACOCNAS
DISTRITO : CORACORA REGIÓN : AYACUCHO

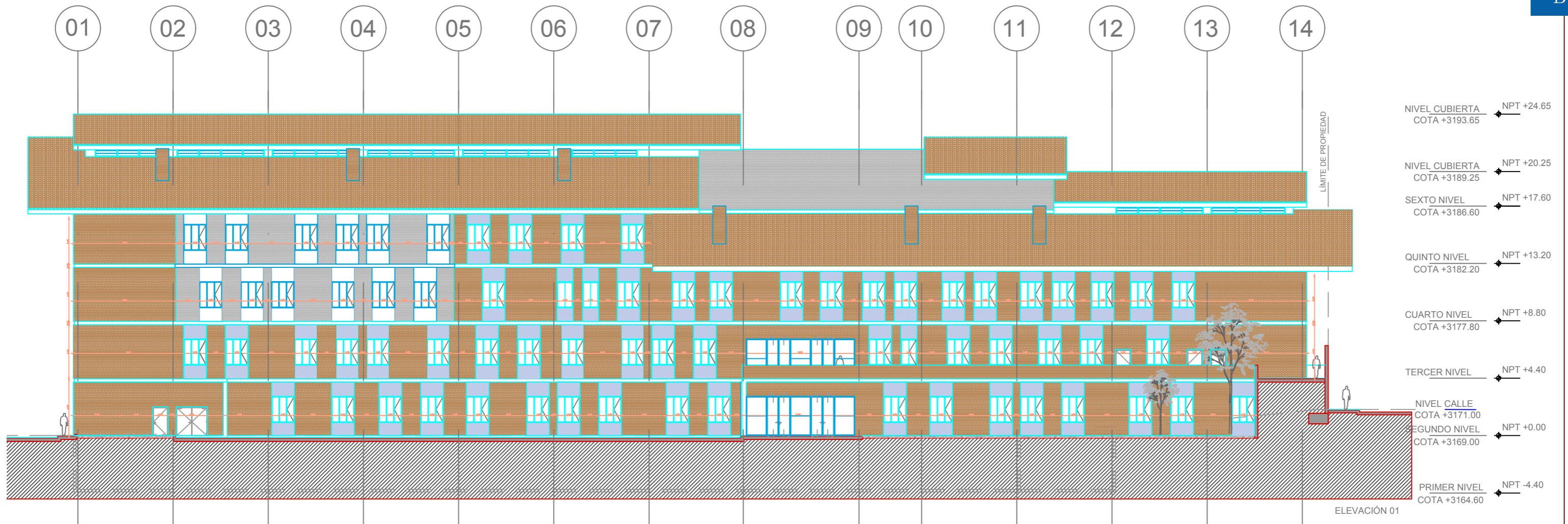



FUENTE:
GOBIERNO REGIONAL DE AYACUCHO – CONSORCIO SAN FRANCISCO

LÁMINA:

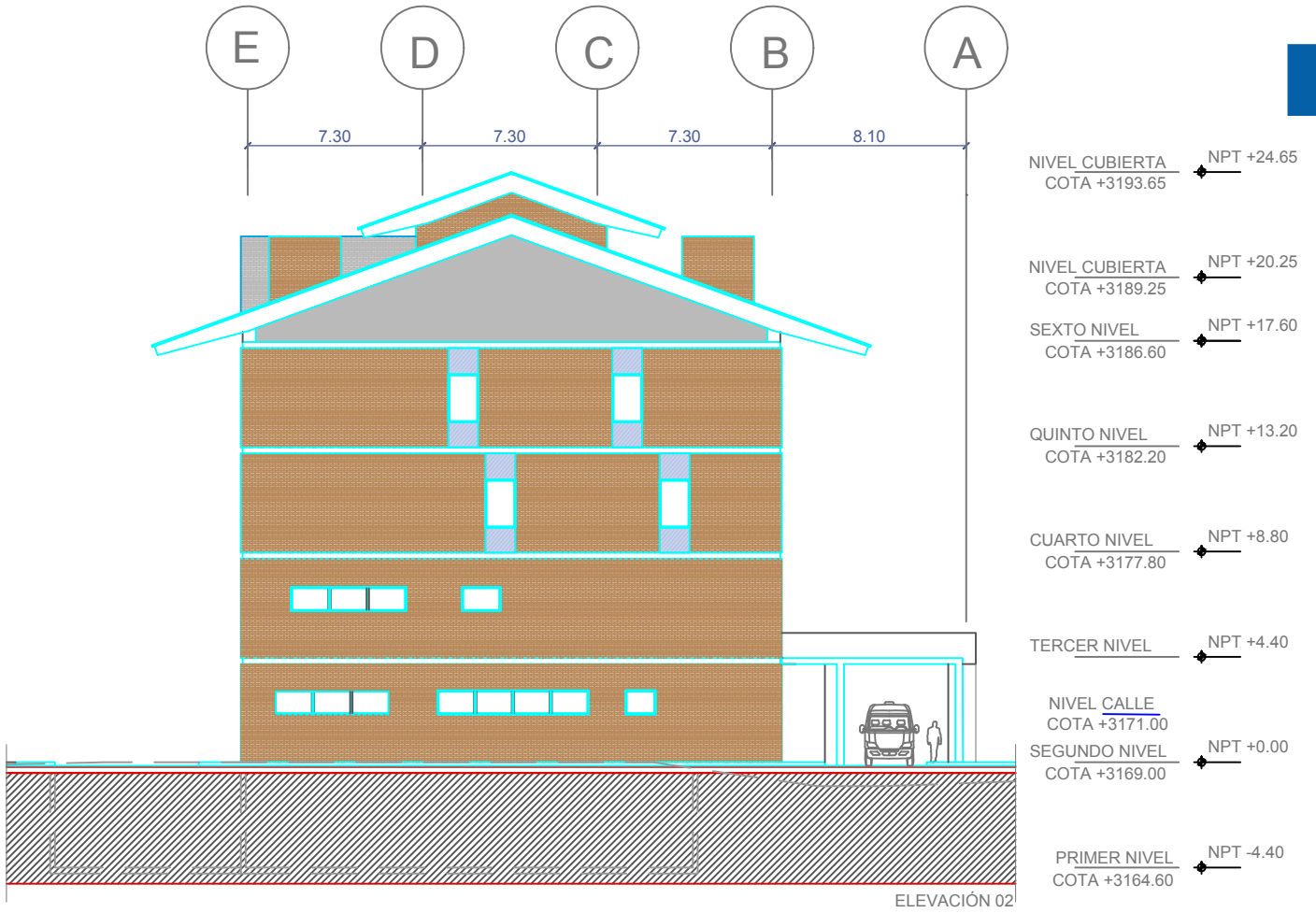
DIBUJO: FECHA: DICIEMBRE/2018 ESCALA: 1/75

A — 1



 <p>UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA</p>		UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA	
		PROYECTO: MEJORAMIENTO DE LA CAPACIDAD RESOLUTIVA DE LA UNIDAD PRODUCTORA DE LOS SERVICIOS DE SALUD DEL HOSPITAL CORACORA – DISTRITO DE CORACORA – PROVINCIA DE PARINACOCNAS, REGIÓN AYACUCHO	
PLANO: ELEVACION 1		UBICACIÓN: LOCALIDAD : CORACORA PROVINCIA : PARINACOCNAS DISTRITO : CORACORA REGIÓN : AYACUCHO	
FUENTE: GOBIERNO REGIONAL DE AYACUCHO – CONSORCIO SAN FRANCISCO		LÁMINA: A – 2	
DIBUJO:	FECHA: DICIEMBRE/2018	ESCALA: 1/75	





UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA

PROYECTO:
MEJORAMIENTO DE LA CAPACIDAD RESOLUTIVA DE LA UNIDAD PRODUCTORA DE LOS SERVICIOS DE SALUD DEL HOSPITAL CORACORA – DISTRITO DE CORACORA – PROVINCIA DE PARINACOCCHAS, REGIÓN AYACUCHO

PLANO: ELEVACIÓN 2

UBICACIÓN: LOCALIDAD : CORACORA PROVINCIA : PARINACOCCHAS
DISTRITO : CORACORA REGIÓN : AYACUCHO

FUENTE:
GOBIERNO REGIONAL DE AYACUCHO – CONSORCIO SAN FRANCISCO

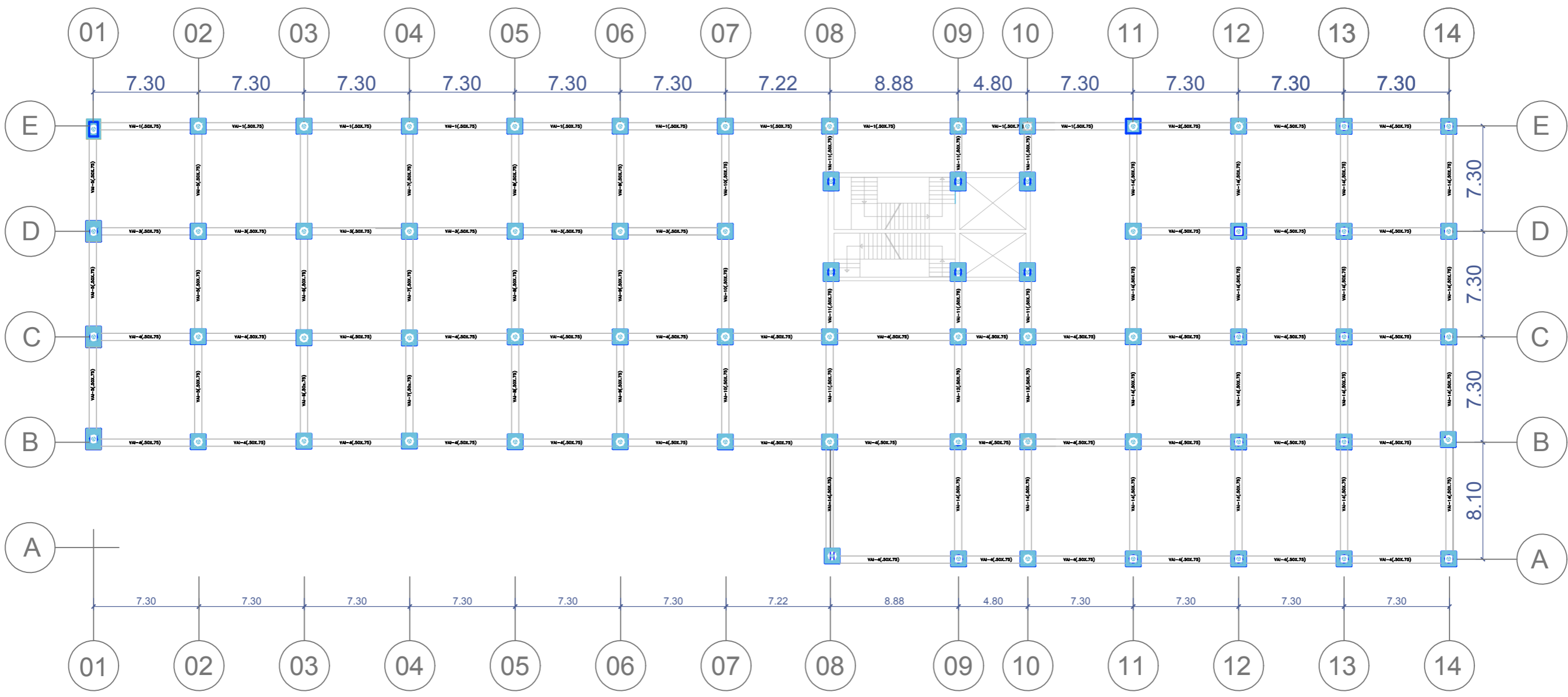
LÁMINA:
A – 3

DIBUJO:

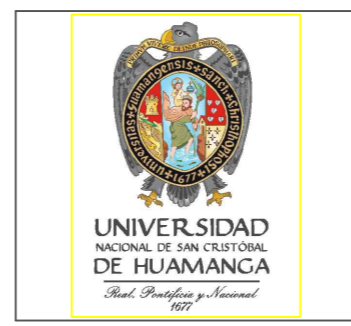
FECHA:
DICIEMBRE/2018

ESCALA:
-





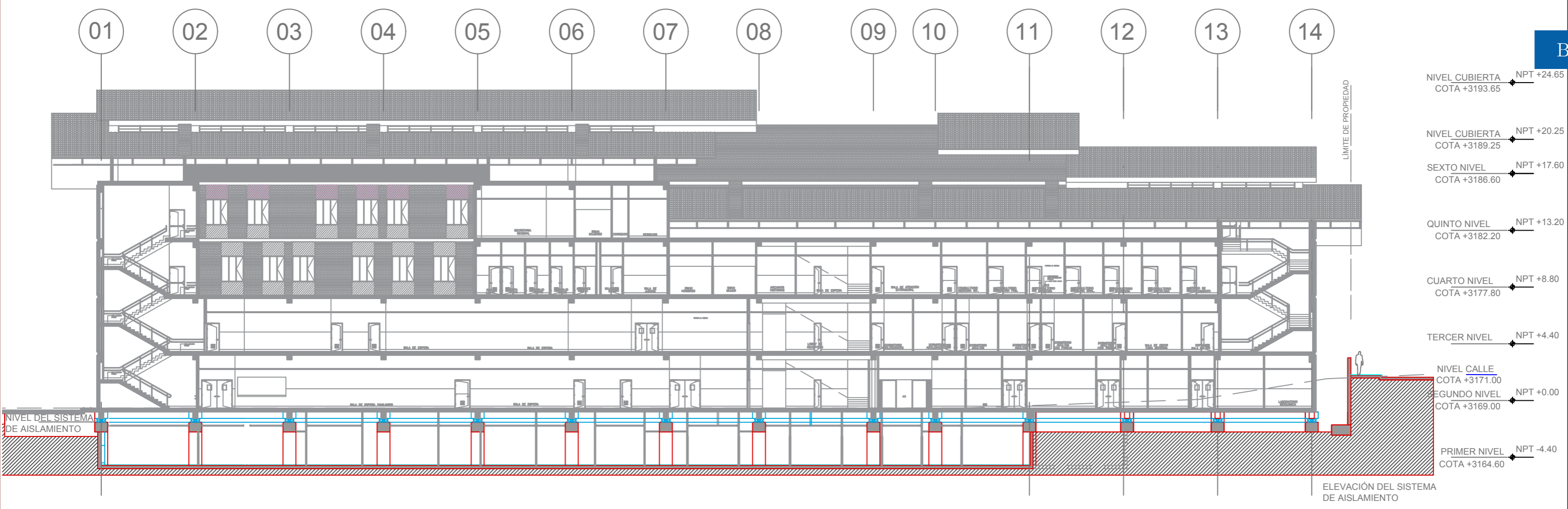
LEYENDA	
	AISLADOR DE TRIPLE PÉNDULO DE FRICCIÓN FPT 8827/14-12/10-6
	VIGA DE CIMENTACIÓN TÍPICA DE 0.50x0.75 m



UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA	
PROYECTO: MEJORAMIENTO DE LA CAPACIDAD RESOLUTIVA DE LA UNIDAD PRODUCTORA DE LOS SERVICIOS DE SALUD DEL HOSPITAL CORACORA – DISTRITO DE CORACORA – PROVINCIA DE PARINACOCHAS, REGIÓN AYACUCHO	
PLANO: UBICACIÓN Y DISTRIBUCIÓN EN PLANTA DE LOS AISLADORES DE BASE FPT 8827/14-12/10-6	
UBICACIÓN:	LOCALIDAD : CORACORA DISTRITO : CORACORA
	PROVINCIA : PARINACOCHAS REGIÓN : AYACUCHO



FUENTE: GOBIERNO REGIONAL DE AYACUCHO – CONSORCIO SAN FRANCISCO		LÁMINA: A – 4
DIBUJO:	FECHA: DICIEMBRE/2018	
		ESCALA: 1/75



LEYENDA	
	AISLADOR DE TRIPLE PÉNDULO DE FRICCIÓN FPT 8827/14-12/10-6

 UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA		
PROYECTO: MEJORAMIENTO DE LA CAPACIDAD RESOLUTIVA DE LA UNIDAD PRODUCTORA DE LOS SERVICIOS DE SALUD DEL HOSPITAL CORACORA – DISTRITO DE CORACORA – PROVINCIA DE PARINACOCNAS, REGIÓN AYACUCHO		
PLANO: UBICACIÓN Y DISTRIBUCIÓN EN ELEVACIÓN DE LOS AISLADORES DE BASE FPT 8827/14-12/10-6		
UBICACIÓN:	LOCALIDAD : CORACORA DISTRITO : CORACORA	PROVINCIA : PARINACOCNAS REGIÓN : AYACUCHO
FUENTE:	GOBIERNO REGIONAL DE AYACUCHO – CONSORCIO SAN FRANCISCO	
DIBUJO:	FECHA: DICIEMBRE/2018	ESCALA: 1/75
		LÁMINA: A-5

