



**Pontificia Universidad
Católica del Ecuador**

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA**

**MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL CON MENCIÓN EN ESTRUCTURAS
SISMORRESISTENTES**

**TRABAJO PREVIO A LA OBTENCION DEL TÍTULO DE
MAGISTER EN INGENIERÍA CIVIL CON MENCIÓN EN ESTRUCTURAS
SISMORRESISTENTES**

TEMA:

**ANÁLISIS DEL USO DE AISLADORES SÍSMICOS DE TRIPLE
PÉNDULO BAJO LA NORMATIVA AMERICANA ASCE 7-22
QUE CUMPLEN CON EL ESTÁNDAR SIS, EN
ESTRUCTURAS DE IMPORTANCIA COMO EL CENTRO DE
INVESTIGACIÓN DE SALUD DE AMÉRICA LATINA DE LA
PUCE.**

Tutor: Ph. D. Pablo Enrique Caiza

Autor: Karla Estefanía Andrade Sánchez

RESUMEN

En la actualidad, el estudio sísmico y los daños que estos producen en las estructuras, es uno de los principales temas que trata la ingeniería civil.

El Ecuador, al estar ubicado geográficamente sobre placas tectónicas, como la placa sudamericana, es fundamental realizar diseños que contemplen los efectos generados por la acción del sismo, así como, opciones que permitan mitigar los daños que generen estos., logrando a su vez que las estructuras se mantengan operativas durante y después de ocurrir un sismo de magnitud importante.

Por lo tanto, este trabajo tiene como enfoque el analizar las ventajas que trae consigo el uso de aisladores sísmicos de triple péndulo dentro de la configuración estructural de edificaciones de importancia como es el Centro de investigación de salud de América Latina de la PUCE, comparando los resultados obtenidos, al utilizar el método planteado por la normativa ASCE 7-22, el método matricial planteado por (Chávez, 2006) y a su vez utilizando el software Etabs.

Al final de la investigación, se verifico que los aisladores FTP, permiten que la estructura sufra menos deformaciones, logrando que la misma se mantenga dentro del rango elástico, dejando los efectos de no linealidad netamente en los aisladores de triple péndulo.

Contenido

1. INTRODUCCIÓN	8
1.1. Justificación.....	8
1.2. Planteamiento del problema.....	9
1.3. Objetivos	9
1.3.1. Objetivo General.....	9
1.3.2. Objetivo Específico	9
1.4. Alcance	10
2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	11
2.1. Aislador de Base	11
2.2. Aislador tipo Péndulo de Fricción	12
2.2.1. Simple Péndulo de Fricción	13
2.2.2. Doble Péndulo de Fricción.....	15
2.2.2.1. Fase de Movimiento I.....	16
2.2.2.2. Fase de Movimiento II.....	17
2.2.3. Triple Péndulo de Fricción	19
2.2.3.1. Fase de Movimiento I.....	22
2.2.3.2. Fase de Movimiento II.....	25
2.2.3.3. Fase de Movimiento III.....	28
2.2.3.4. Fase de Movimiento IV	30
2.2.3.5. Fase de Movimiento V	32
3. DISEÑO DEL AISLADOR DE TRIPLE PÉNDULO FPT.....	35
3.1. Objetivos de Diseño	36
3.2. Ubicación de los aisladores.....	38
3.3. Diseño preliminar de los aisladores de triple péndulo de fricción.....	40
3.3.1. Método Fuerza lateral equivalente ASCE 7-22.....	40
3.3.2. Método según Análisis Sísmico Moderno, Salvador Ismael Gómez Chávez 49	
3.3.3. Método Modelo Tri-lineal	54
3.3.4. Método Simplificado a dos grados de libertad.	58
4. CASO DE ESTUDIO.....	63
4.1. Introducción.....	63
4.2. Información del proyecto	63
4.2.1. Cargas del Edificio.....	64
4.2.2. Peligro Sísmico.....	65

4.2.3. Resultados Obtenidos	70
4.3. Diseño del aislador de fricción de triple péndulo (FTP).....	72
4.3.1. Objetivo del uso de Aisladores FTP.....	72
4.3.2. Definición de Ubicación de los aisladores.	72
4.3.3. Contacto con el proveedor-aislador a usarse	74
4.3.4. Factores de fricción del aislador FPT8833	74
4.4. Aplicación Método Fuerza Lateral Equivalente	74
.....	76
.....	77
4.5. Aplicación Método Análisis Sísmico Moderno según (Chávez, 2006).....	81
4.6. Calculo de las Propiedades en el software Etabs de los aisladores de triple péndulo.	86
4.6.1. Datos generales del aislador.	87
4.6.2. Propiedades específicas en cada dirección.....	88
4.7. Comportamiento de la estructura al utilizar aisladores sísmicos	92
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	97
5.1. Conclusiones.....	97
5.2. Recomendaciones.....	98
Bibliografía	99

Figura 1. Edificio con base fija vs Edificio con base aislada (Chávez, 2006)	11
Figura 2. Tipos de aisladores FPS. a) Simple, b) Doble, c) Triple (Fenz D. , Constantinou M., 2008) (Puchaicela, 2018)	12
Figura 3. Aislador de simple péndulo, primera generación. (Earthquake Protection Systems, 2021)	13
Figura 4. Diagrama de cuerpo libre del aislador de simple péndulo	14
Figura 5. Aislador Doble Péndulo de Fricción, DFP (M.C Constantinou, I. Kalpakidis, A. Filiatrault, R.A Ecker Lay, 2010)	16
Figura 6. Fase I, Aislador Doble Péndulo – Diagrama de cuerpo libre (Fenz & Constantinou, 2006)	17
Figura 7. Fase de Movimiento 2 (Fenz & Constantinou, 2006)	18
Figura 8. Curva de histéresis Aislador de Doble Péndulo (Fenz & Constantinou, 2006)	19
Figura 9. Aislador Triple Péndulo de Fricción, (W. J. McVitty & M. C. Constantinou, 2015)	20
Figura 10. Diagrama de cuerpo libre – Fase de Movimiento I (Daniel M. Fenz and Michael C. Constantinou, 2008)	23
Figura 11. Curva de histéresis Fase I, (Daniel M. Fenz and Michael C. Constantinou, 2008)	25
Figura 12. Diagrama de Cuerpo Libre – Fase II. (Daniel M. Fenz and Michael C. Constantinou, 2008)	26
Figura 13. Curva de histéresis Fase II, (Daniel M. Fenz and Michael C. Constantinou, 2008)	28
Figura 14. Curva de Histéresis Fase III, (Daniel M. Fenz and Michael C. Constantinou, 2008)	30
Figura 15. Diagrama de Cuerpo Libre – Fase IV. (Daniel M. Fenz and Michael C. Constantinou, 2008)	31
Figura 16. Curva de histéresis Fase IV, (Daniel M. Fenz and Michael C. Constantinou, 2008)	32
Figura 17. Curva de histéresis Fase V (Daniel M. Fenz and Michael C. Constantinou, 2008)	33
Figura 18. Aislador Triple Péndulo de Fricción, (W. J. McVitty & M. C. Constantinou, 2015)	35
Figura 19. Ubicación en planta de aisladores en el Hospital Okmeydani and Goztepe, Turquía. (Protection, 2021)	39
Figura 20. Ubicación de aisladores en elevación. (Puchaicela, 2018) (Zayas, V., Low, S., & Mahin, S., 1990)	39
Figura 21. Nomenclatura del aislador FTP – Diámetros y desplazamientos (Puchaicela, 2018)	43
Figura 22. Representación 2D de edificio con base fija y base aislada	49
Figura 23. Calculo de Energía Disipada y Energía Elástica (Pablo Leiva, Roberto Aguiar, 2017)	57
Figura 24. Modelo 3D del Bloque A del Centro de Investigación de Salud de América Latina de la PUCE	63
Figura 25. Planta del Bloque A del Centro de Investigación de Salud de América Latina de la PUCE	64
Figura 26. Cargas gravitacionales aplicadas en el edificio de estudio	64
Figura 27. Coeficiente cortante basal, Sismo en X	68
Figura 28. Coeficiente cortante basal, Sismo en Y	68

Figura 29. Función Espectro de diseño, NEC 2015-Etabs	69
Figura 30. Relación Demanda/Capacidad	70
Figura 31. Relación Demanda/Capacidad – Vigas secundarias	70
Figura 32. Deriva de piso – Sismo X	71
Figura 33. Deriva de piso – Sismo Y	71
Figura 34. Ubicación en elevación de los aisladores sísmicos	72
Figura 35. Ubicación en primera planta, por desnivel en elevación	73
Figura 36. Ubicación en elevación de los aisladores sísmicos	73
Figura 37. Vista en planta aisladores sísmicos	73
Figura 38. Geometría del aislador FPT8833	74
Figura 39. Geometría del aislador FPT8833	75
Figura 40. Peso Muerto y Sobre carga de la estructura analizada	76
Figura 41. Valores S_s y S_1 – IGEPN	78
Figura 42. Propiedades generales del aislador FPT8833 - Etabs	88
Figura 43. Propiedades en la dirección U1 del aislador FPT8833 – Etabs	89
Figura 44. Propiedades lineales en dirección U2 y U3 del aislador FPT8833 – Etabs	90
Figura 45. Propiedades no lineales en dirección U2 y U3 del aislador FPT8833 – Etabs	92
Figura 46. Espectro de respuesta ASCE 7-22	93
Figura 47. Periodo de la estructura, $T = 3.11$ s.	94
Figura 48. Deriva Q_x de estructura con aisladores FPT8833.	94
Figura 49. Relación de esfuerzos vigas y columnas	95
Figura 50. Relación de esfuerzos vigas compuestas	95
Figura 51. Desplazamiento máximo	96
Figura 52. Cortante máximo	96

Tabla 1. Esquema relación Fuerza-Desplazamiento (W. J. McVitty & M. C. Constantinou, 2015)	22
Tabla 2. Parámetros de diseño para evitar daños y mantener funcional la estructura, los componentes no estructurales, y los contenidos (Zayas, V., & Mahin, S., 2010)	37
Tabla 3. Parámetros de diseño para evitar daños y mantener funcional la estructura, los componentes no estructurales, y los contenidos (Zayas, V., & Mahin, S., 2010)	38
Tabla 4. Valores de R_1 - R_4 , (Constantinou, M., Whittaker, A., Kalpakidis, Y., Fenz, D., & Warn, G., 2007)	41
Tabla 5. Ecuaciones desplazamiento máximo – Método ELF	45
Tabla 6. Factor de Amortiguamiento B_M Fuente: ASCE 7-16	45
Tabla 7. Ecuaciones Fuerzas Laterales Mínimas	46
Tabla 8. Límites V_s según ASCE 7-22	47
Tabla 9. Factor sísmico de importancia Fuente: ASCE 7-22	48
Tabla 10. Resumen cargas gravitacionales	65
Tabla 11. Zona Sísmica, NEC 2015	65
Tabla 12. F_a , Coeficiente de amplificación de suelo en la zona de período corto, NEC 2015	66
Tabla 13. F_d , amplificación de las ordenadas del espectro elástico de respuesta de desplazamiento para diseño en roca, NEC 2015	66
Tabla 14. F_s , Factor de comportamiento no lineal de los suelos, NEC 2015	66
Tabla 15. Coeficiente I , NEC 2015	67
Tabla 16. Parámetros del aislador FPT8833	75

Tabla 17. Radios efectivos aislador	75
<i>Tabla 18. Distancias efectivas aislador</i>	76
Tabla 19. Coeficientes de fricción superficies externas	76
Tabla 20. Coeficientes de fricción superficies internas	77
Tabla 21. Resultados método fuerza lateral equivalente	80
Tabla 22. Propiedades geométricas del aislador FPT8833	91
Tabla 23. Propiedades no lineales del aislador FPT8833	91

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Justificación

En las obras de infraestructura, una de las causales que más daños provocan en las mismas, son generalmente producidos por los movimientos telúricos, que son capaces de ocasionar daños parciales o totales en las estructuras. En la actualidad con el fin de mitigar estos efectos, la ingeniería sísmica se ha enfocado en desarrollar normativa y nuevas prácticas de diseño sismo resistente, otorgando en las estructuras, márgenes de seguridad más exigentes que no se limiten solo a evitar el colapso del sistema estructural.

Los avances que se han venido desarrollando con el paso de los años en cuanto al análisis y diseño sismo-resistente se ha dado por los daños que se originan después de ocurrir un movimiento telúrico, sin embargo, el enfoque principal de estos, se da al sistema estructural mas no al daño que se puede producir en los elementos arquitectónicos, como por ejemplo la mampostería, a pesar de que el daño en estos elementos es uno de los principales factores para evitar la funcionalidad de las instalaciones al producirse un evento sísmico. (Choque-Bustanza, 2022)

En la Norma Ecuatoriana de la construcción, se tiene como principal objetivo, el no permitir el colapso de la estructura y precautelar la vida humana, mas no, mantener la funcionalidad, teniendo en cuenta, que el fallo de los elementos arquitectónicos no está asociado de manera directa con la pérdida de vidas humanas, el estudio de estos elementos es limitado.

Sin embargo, en datos estadísticos de las pérdidas de vidas humanas, se asocia el 50% a personas que fallecen por daños estructurales y el 50% restante corresponde a personas que fallecen en camino a los hospitales, los mismos que pierden funcionalidad inmediata por los daños severos que se presentan en los componentes arquitectónicos.

El diseño estructural convencional, empleando sistemas de ductilidad, al agregar elementos que ayuden a controlar o limitar los daños en los elementos arquitectónicos y en el sistema estructural, permite generar una funcionalidad inmediata reduciendo las pérdidas humanas y económicas que resultan después de presentarse un terremoto. (Eduardo Marín, 2022)

1.2. Planteamiento del problema

El Centro de Investigación de Salud de América Latina de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador, es una edificación de uso educativo, por lo que, según lo establecido en la Norma Ecuatoriana de la Construcción vigente, se considera una edificación esencial.

Este establecimiento, se encuentra ubicado en Nayón – Quito, se conoce de antemano que la capital del Ecuador, y el país en general, es considerado una zona con alta sismicidad, por lo que, esta estructura, puede estar sometida a acciones de fuerzas laterales producidas por sismos en varias ocasiones.

Un evento importante, que sacudió la realidad del país, es el sismo suscitado en abril del 2016, cuando en Pedernales-Manabí, se registró un sismo de magnitud 7.8Mw, generando, según la Secretaría de Planificación y Desarrollo del Ecuador, alrededor de 241 mil millones de dólares en gastos en el sistema de salud.

Ese monto corresponde no solo a daños estructurales de los edificios, sino también al gasto en la respuesta inmediata, es decir traslado de heridos a hospitales que mantenían su funcionalidad, despliegue de equipos de emergencia, nuevas contrataciones médicas, etc, gastos, que se pueden reducir, al utilizar en edificaciones de importancia, el criterio de diseño de funcionalidad inmediata, el mismo que se consigue al aplicar la filosofía de diseño sugerida por Víctor Zayas, PhD, Estándar de Aislamiento Sísmico para la Funcionalidad Continua o conocido por sus siglas SIS, el mismo que tiene como primicia el minimizar el daño por efectos del sismo a los componentes arquitectónicos e instalaciones, reduciendo el costo de reparación de los mismos al menos del 2% al 4%, basándose en lo expuesto por Resiliencia Platino u Oro de REDi.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Análisis del uso de aisladores sísmicos de triple péndulo bajo la normativa americana ASCE 7-21 cumpliendo con el estándar SIS, en estructuras de importancia como el Centro de Investigación de Salud de América Latina de la PUCE.

1.3.2. Objetivo Específico

- Obtener criterios, base teórica y ecuaciones que gobiernan el comportamiento de los aisladores de triple péndulo.

- Analizar los beneficios que puede traer el remplazar las cimentaciones tradicionales por cimentaciones de base aislada.
- Evaluar la propuesta planteada a través de la simulación en el Software de Diseño Etabs.
- Realizar el análisis sísmico del Centro de Investigación de Salud de América Latina de la PUCE usando aisladores de triple péndulo, utilizando la normativa ASCE 7-21
- Elaborar un procedimiento de cálculo y diseño de aisladores de triple péndulo.

1.4. Alcance

El presente trabajo tiene como principal objetivo, analizar el uso de aisladores sísmicos de triple péndulo bajo la normativa americana ASCE 7-21 cumpliendo con el estándar SIS, en estructuras de importancia como el Centro de Investigación de Salud de América Latina de la PUCE. Por este motivo, la finalidad de esta investigación es conocer el procedimiento adecuado para poder diseñar y seleccionar el aislador de triple péndulo adecuado para que funcione de manera correcta en función de las características geométricas y solicitaciones que se presentan dentro de la estructura en estudio.

El análisis de este tipo de aisladores se realiza bajo dos métodos de cálculo, siendo el principal, el planteado por la norma ASCE 7-22, en la cual se basa el Estándar SIS, y por el procedimiento planteado en el libro Análisis Sísmico Moderado, Ética Aplicada. (Chávez, 2006), realizando una comparación entre ambos en función de los resultados obtenidos en cuanto a características geométricas del aislador se refiere.

CAPÍTULO 2

2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

2.1. Aislador de Base

Se conoce como aisladores de base a los dispositivos, que generan una discontinuidad en la estructura, logrando así que la base de la misma se comporte como un piso débil, en donde se concentraran las deformaciones que se generen por la acción del sismo.

Al comparar dos tipos de estructuras, uno con base fija y otra con aisladores de base, se conoce que, en el primer caso, los elementos estructurales son los que absorben las deformaciones generadas por el sismo, mientras que, en el segundo modelo, la energía producida por el sismo, se disipa en los aisladores gracias al mecanismo propio de ellos.

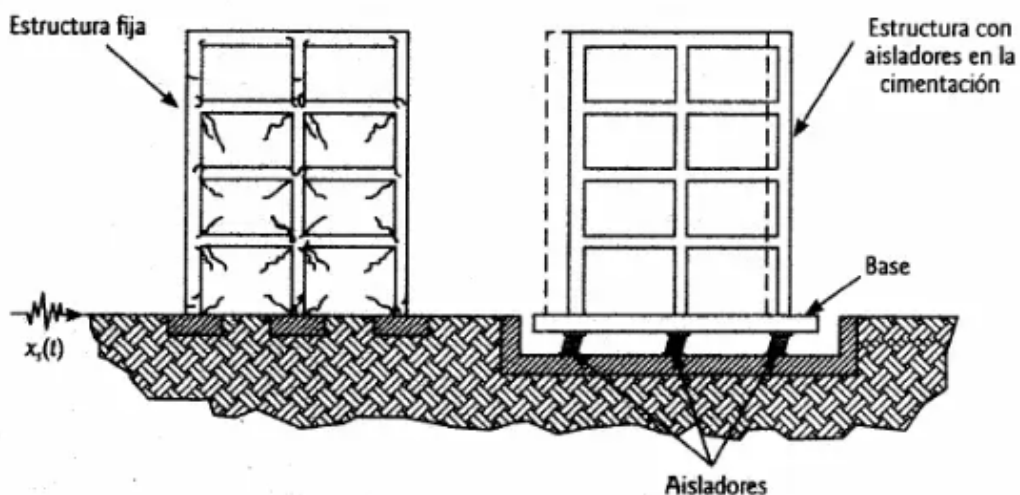


Figura 1. Edificio con base fija vs Edificio con base aislada (Chávez, 2006)

En la figura 1, a la derecha se muestra los posibles daños estructurales que se pueden producir por la acción de una fuerza lateral, cuando la base de la estructura no está aislada, mientras que, en la parte izquierda, se aprecia el comportamiento de la misma estructura usando aisladores sísmicos en la base.

En el análisis sísmico de estructuras, uno de los temas que mayor importancia tiene es la peligrosidad sísmica, más cuando se usa dispositivos de control pasivo, que en este caso vienen a ser los aisladores sísmicos, pues estos cumplen el papel primordial al disipar la energía producida por el sismo. (Michael Constantinou, Roberto Aguiar, Enrique Morales, Pablo Caiza, 2016)

Hoy en día, existen dos tipos de aisladores que se han logrado posicionar en el mercado, cada uno con diferentes mecanismos de disipación de energía, los LRB, mejor conocidos como aisladores de neopreno (Lead Rubber Bearing) y los FPS, aisladores de péndulo de fricción (Friction Pendulum System), estos últimos se

dividen en tres generaciones de diseño, de péndulo simple, péndulo doble y péndulo triple.

Según, (Puchaicela, 2018), este último tipo de aislador, el de triple péndulo, de tercera generación permite controlar tanto los desplazamientos, así como el cortante basal.

Por lo tanto, el aislador de triple péndulo, será el utilizado dentro de este trabajo de titulación.

2.2. Aislador tipo Péndulo de Fricción

Existen tres tipos de aisladores de péndulo de fricción, los de primera generación, que su configuración es una superficie cóncava y otra recta, segunda generación, en el cual las placas superior e inferior son cóncavas, y por último el de tercera generación, el mismo que contiene un aislador de segunda generación dentro de otro aislador.

Este tipo de aislador ha logrado que las dimensiones de los aisladores sean más pequeñas, permitiendo que los desplazamientos sean mayores, además de conseguir un desempeño en función de la demanda. (R. Aguir, E. Morales, B. Gauyguá, M. Rodríguez, 2016)

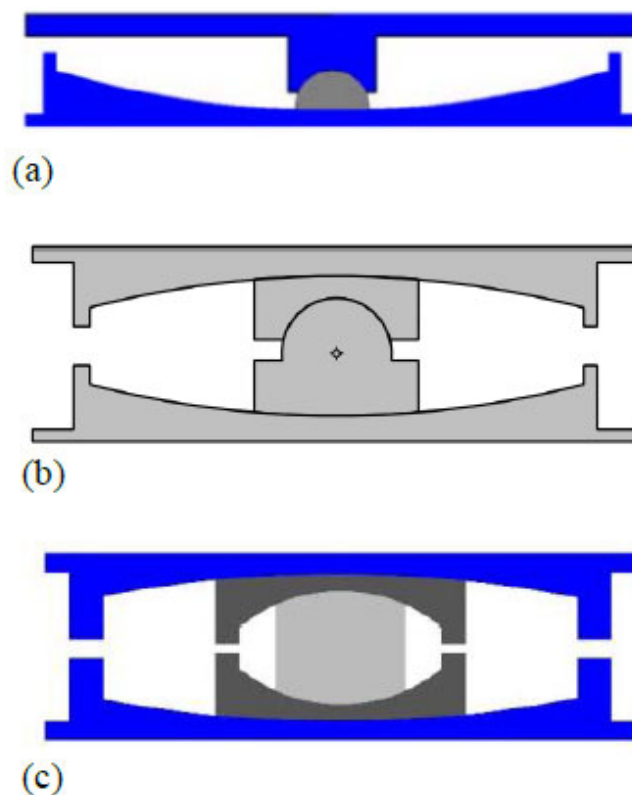


Figura 2. Tipos de aisladores FPS. a) Simple, b) Doble, c) Triple (Fenz D. , Constantinou M., 2008) (Puchaicela, 2018)

La figura 2, evidencia la evolución de los prototipos de aisladores de base., el literal a) muestra el aislador de simple péndulo, b) muestra la geometría de un aislador de doble péndulo y el literal c) presenta el aislador de triple péndulo. (Ver figura 2)

2.2.1. Simple Péndulo de Fricción

Los aisladores de simple péndulo de fricción, son el primer prototipo de aisladores de péndulo de fricción.

Este tipo de aisladores son fabricados en acero inoxidable, y su configuración consta en la base de una placa cóncava, un patín esférico articulado y una placa superior recta. Al tener un único deslizador se mantiene el soporte de la carga vertical en el centro de la estructura, trayendo con su uso ventajas en el sistema estructural si este fuese débil.

El aislador de simple péndulo (SPF), mantiene constante la fricción, la rigidez lateral y el periodo dinámico para todos los niveles y desplazamientos sísmicos. (Earthquake Protection Systems, 2021)

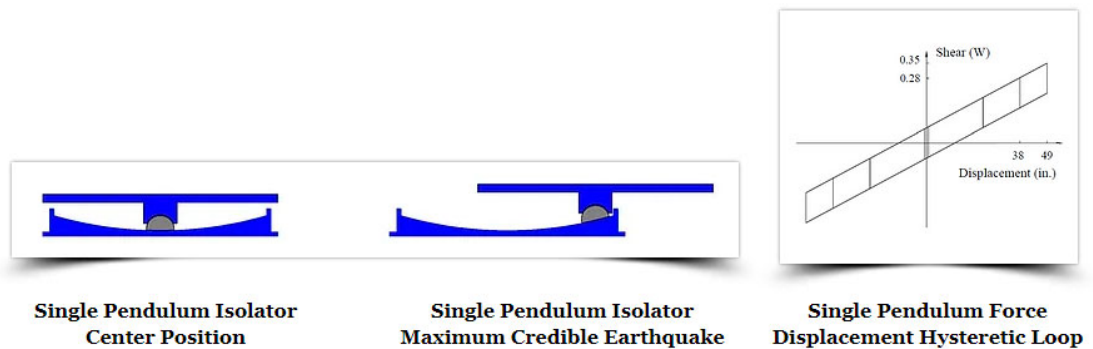


Figura 3. Aislador de simple péndulo, primera generación. (Earthquake Protection Systems, 2021)

Ciclo de movimiento del aislador de simple péndulo, con la representación de su curva de desplazamiento histerético. (Ver figura 3)

Los parámetros que rigen el comportamiento del aislador SPF, son:

- La fricción que se produce en la base del dispositivo y el deslizador (μ)
- El radio de curvatura de la superficie (R).

La energía se logra disipar por medio de la fricción que se produce, mientras que el radio de curvatura incrementa el periodo de vibración de la estructura, este comportamiento se logra demostrar en la relación fuerza-desplazamiento. (Pucaicela, 2018).

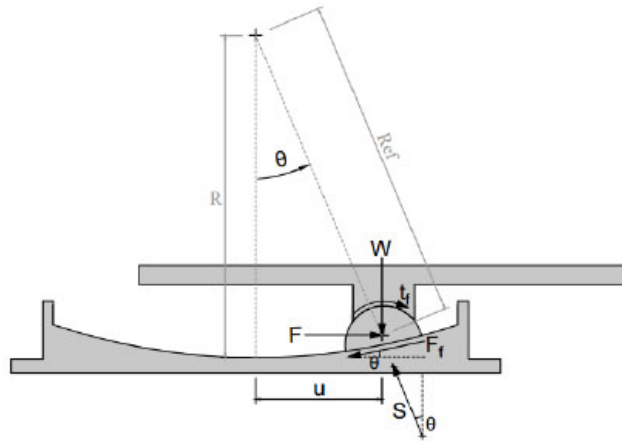


Figura 4. Diagrama de cuerpo libre del aislador de simple péndulo

En la figura 4 se muestra el diagrama de cuerpo libre de las fuerzas que se generan una vez que entra en movimiento el aislador de simple péndulo. (Ver figura 4)

A continuación, basándonos en lo expuesto por (Puchaicela, 2018), se muestra una serie de demostraciones que permiten entender de mejor manera el comportamiento de los aisladores de simple péndulo.

- Equilibrio de fuerzas:

$$\Sigma F_x = 0, \quad F - S \cdot \text{sen}(\theta) - F_f \cdot \cos(\theta) = 0 \quad (\text{Eq.1})$$

$$\Sigma F_y = 0, \quad S \cdot \cos(\theta) - W - F_f \cdot \text{sen}(\theta) = 0 \quad (\text{Eq.2})$$

- Cálculo de S (despejando de Eq.1) y F (Eq.3 en Eq.2)

$$S = \frac{F - F_f \cdot \cos(\theta)}{\text{sen}(\theta)} \quad (\text{Eq.3})$$

$$\frac{F - F_f \cdot \cos(\theta)}{\text{sen}(\theta)} \cdot \cos(\theta) - W - F_f \cdot \text{sen}(\theta) = 0$$

$$F = W \cdot \frac{\text{sen}(\theta)}{\cos(\theta)} + \frac{F_f}{\cos(\theta)} = 0 \quad (\text{Eq.4})$$

- Desplazamiento horizontal

$$u = R_{ef} \text{sen}(\theta) \quad (\text{Eq.5})$$

$$F = W \cdot \frac{u}{R_{ef} \cos(\theta)} + \frac{F_f}{\cos(\theta)} \quad (\text{Eq.6})$$

Asumiendo que el radio de curvatura es mayor al desplazamiento, se obtiene que $\cos(\theta)=1$

$$F = \frac{W}{R_{ef}} \cdot u + F_f \quad (\text{Eq.7})$$

De la ecuación Eq.7, se puede determinar que el primer término representa la fuerza de restauración por la gravedad, mientras que F_f representa la disipación de energía. (Fenz D. , Constantinou M., 2008)

Para el periodo de vibración es necesario usar la ecuación del movimiento armónico simple,

$$T = \frac{2\pi}{\omega}, \text{ donde } \omega = \sqrt{\frac{K}{m}}$$

Por lo tanto, sabiendo que $K_b=K= W/ R_{ef}$ y que la masa $m= W/g$, se obtiene la siguiente expresión.

$$T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{R_{ef}}{g}} \quad (\text{Eq.8})$$

Con esto queda demostrado que, el periodo de la estructura en los aisladores de simple péndulo solo depende del radio de curvatura efectivo y que comportamiento del sistema no tiene relación con la carga de la estructura. (Puchaicela, 2018)

2.2.2. Doble Péndulo de Fricción

El aislador de doble péndulo, son aquellos que, dentro de su configuración, tienen dos placas cóncavas y un deslizador articulado. Las propiedades de radio de curvatura

El aislador de doble péndulo, dentro de su configuración estructural, está compuesto por dos placas cóncavas y un deslizador articulado. Las propiedades que lo definen son el radio de curvatura, el coeficiente de fricción y la capacidad de desplazamientos, las mismas que se definan como R_{1-2} , μ_{1-2} y d_{1-2} respectivamente.

Adicional a esto, se conoce que las alturas h_1 y h_2 , están medidas desde el punto pivote hasta el punto más alto de la curvatura de las placas, y que su radio de curvatura efectivo viene dado en función de la siguiente expresión.

$$R_{ef1-2} = R_{1-2} - h_{1-2} \quad (\text{Eq.9})$$

Una diferencia importante que tienen los DFP de los SFP, es el tamaño en planta del aislador, esto debido a que, los DFP, tienen mayor capacidad de desplazamiento al combinar el efecto de las dos placas, además, al tener dos péndulos tienen la opción de cambiar la rigidez y el amortiguamiento al incrementar la demanda sísmica. (Puchaicela, 2018)

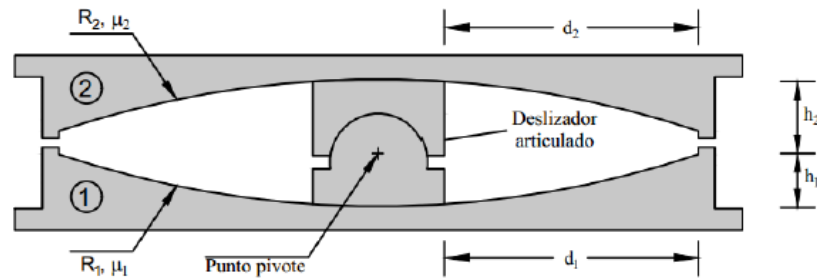


Figura 5. Aislador Doble Péndulo de Fricción, DFP (M.C Contantinou, I. Kalpakidis, A. Filiatrault, R.A Ecker Lay, 2010)

Elementos que conforman la geometría del aislador de doble péndulo, se indica sus componentes y los nombres de cada uno de ellos. (Ver figura 5)

En los aisladores de doble péndulo, se conoce que tiene dos fases de movimiento, la primera es aquella en donde el deslizador articulado, se mueve sobre la superficie de la placa 1, y la fase 2 del movimiento es cuando el deslizador se mueve de manera simultánea en las dos placas que conforman el aislador.

2.2.2.1. Fase de Movimiento I

La Fase de Movimiento I, se genera cuando el deslizador se mueve sobre la placa inferior (placa 1), pero se mantiene fijo en la placa superior (placa 2), tal como se logra ver en la Figura 6, literal a.

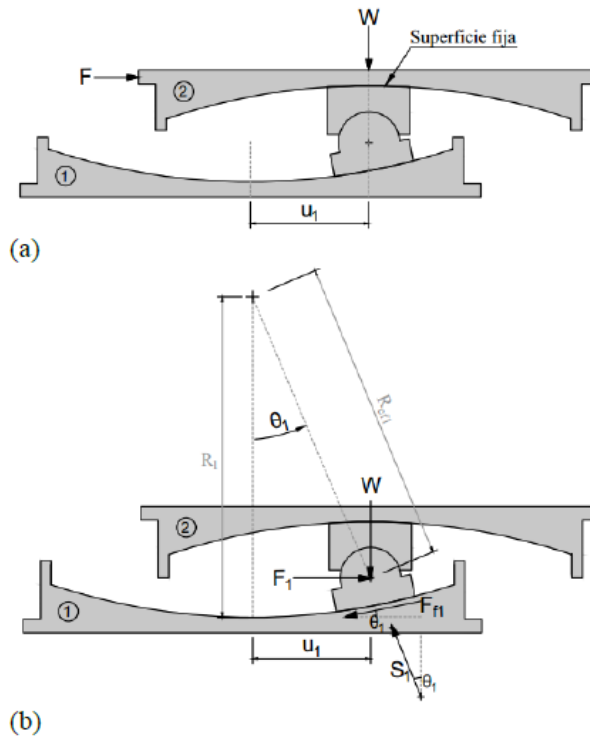


Figura 6. Fase I, Aislador Doble Péndulo – Diagrama de cuerpo libre (Fenz & Constantinou, 2006)

El literal a) presenta el ciclo de movimiento del aislador de doble péndulo. El literal b) presenta el diagrama de cuerpo libre del aislador, junto a las fuerzas que actúan sobre el mismo. (Ver figura 6)

Como se puede ver en la figura 6b, el comportamiento en la Fase I del aislador DFP, es similar al del aislador SFP, por lo que, la ecuación que define el comportamiento del aislador es la ya mencionada con anterioridad, identificando ahora la placa donde se genera el movimiento, es decir la placa 1. (Puchaicela, 2018)

$$F = \frac{W}{R_{ef1}} * u_1 + F_{f1} \quad (\text{Eq.10})$$

$$u_1 = R_{ef1} * \text{sen}\theta_1 \quad (\text{Eq.11})$$

2.2.2.2. Fase de Movimiento II

Esta fase de movimiento se genera, una vez que el cuerpo deslizador empieza su movimiento en la placa 2, sin embargo, el movimiento de la placa 1, no se detiene, es decir se produce movimiento simultaneo.

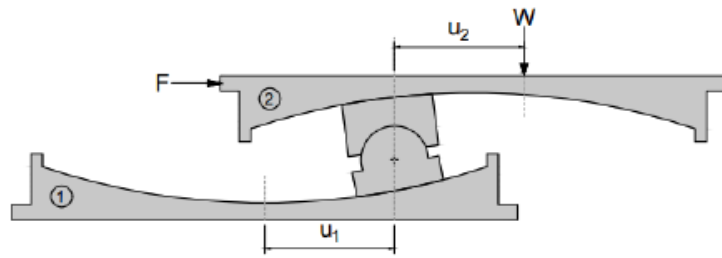


Figura 7. Fase de Movimiento 2 (Fenz & Constantinou, 2006)

Se muestra en la figura 7, el movimiento de la fase 2 del aislador de doble péndulo, cuando la placa 2 inicia el movimiento y el movimiento de la placa 1 se mantiene. (Ver figura 7)

Las ecuaciones que definen el comportamiento del aislador en esta fase, varían en función del análisis de cada placa, es decir, para el movimiento del deslizador sobre la placa inferior se usa Eq.10. Al analizar la fase II de movimiento las ecuaciones utilizadas son las siguientes.

$$F = \frac{W}{R_{ef2}} * u_2 + F_{f2} \quad (\text{Eq.12})$$

$$u_2 = R_{ef2} * \text{sen}\theta_2 \quad (\text{Eq.13})$$

Como se explicó con anterioridad, los desplazamientos en el aislador DFP, es simultaneo, es decir:

$$u = u_1 + u_2 \quad (\text{Eq.14})$$

Por lo tanto, al despejar u de las Eq.10 y Eq.12, se obtiene lo siguiente:

$$u_1 = (F - F_{f1}) \frac{R_{ef1}}{W} \quad (\text{Eq.15})$$

$$u_2 = (F - F_{f2}) \frac{R_{ef2}}{W} \quad (\text{Eq.15})$$

Con el fin de obtener la ecuación que representa la fuerza-desplazamiento de la segunda fase de movimiento, se reemplaza u1 y u2, en Eq.14.

$$F = \frac{w}{R_{ef1} + R_{ef2}} u + \frac{F_{f1}R_{ef1} + F_{f2}R_{ef2}}{R_{ef1} + R_{ef2}} \quad (\text{Eq.16})$$

Al analizar el movimiento completo del aislador, tanto la Fase I de movimiento, como la Fase II, se obtiene la curva de histéresis, la misma que según (Fenz & Constantinou, 2006), la primera pendiente representa la Fase de movimiento 1 y la segunda pendiente representa la Fase II.

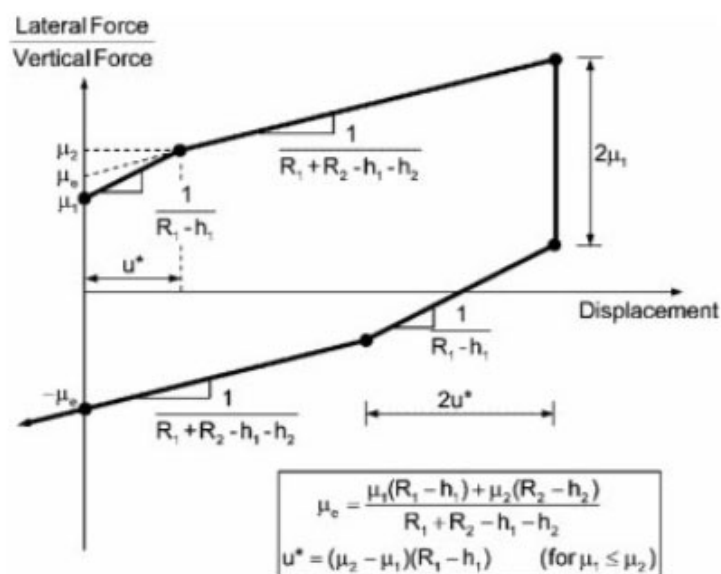


Figura 8. Curva de histéresis Aislador de Doble Péndulo (Fenz & Constantinou, 2006)

Curva fuerza vs desplazamiento del aislador de doble péndulo de todas sus fases de movimiento. (Ver figura 8)

2.2.3. Triple Péndulo de Fricción

Los aisladores de Triple Péndulo de Fricción, son los aisladores más modernos en la actualidad, los mismos que son desarrollados, por la empresa Earthquake Protection System (EPS), bajo la autoría de Victor Zayas, es importante conocer esta empresa dispone de la patente de este tipo de aislador.

Adicional, Victor Zayas, PhD, plantea una metodología Estándar de Aislamiento Sísmico, el cual permite mantener la funcionalidad continua de la estructura (SIS), el mismo que trabaja conjuntamente con lo especificado en el ASCE 7-22, esta metodología será usada dentro del desarrollo del presente trabajo de titulación.

Este tipo de aislador, está compuesto por 4 placas cóncavas (2 internas y dos externas) y un deslizador rígido, dispone de 12 propiedades geométricas y 4 propiedades mecánicas.

Las propiedades geométricas vienen definidas por radio de curvatura (R_1, R_2, R_3, R_4), alturas (h_1, h_2, h_3, h_4) y desplazamientos (d_1, d_2, d_3, d_4), y sus propiedades mecánicas, vienen dadas por los factores de fricción ($\mu_1, \mu_2, \mu_3, \mu_4$).

Con el fin de reducir las incógnitas, dentro del análisis, se plantea las siguientes igualdades y ecuaciones:

Radio de Curvatura – Radio de Curvatura efectivo

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

$$R_{ieff} = R_i - h_i \quad (\text{Eq.17})$$

$$R_{ef1} = R_{ef4} \gg R_{ef2} = R_{ef3}$$

Coefficiente de Fricción

$$\mu_1 = \mu_4 > \mu_2 = \mu_3$$

Desplazamientos

$$d_1 = d_4 > d_2 = d_3$$

Desplazamiento efectivo

$$d_{i^*} = d_i \times \frac{R_{i \text{ eff}}}{R_i} \quad (\text{Eq.18})$$

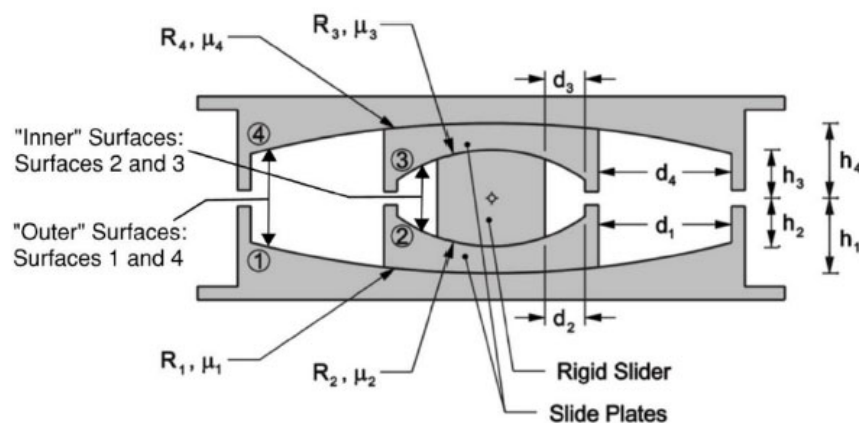





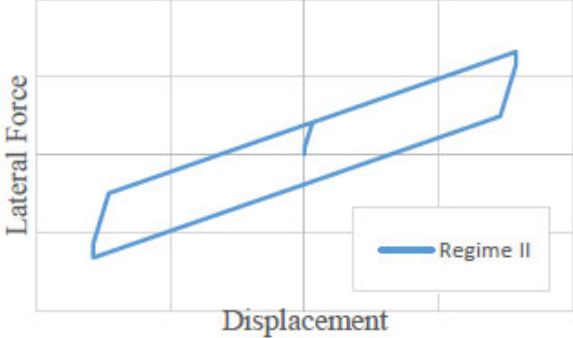
Figura 9. Aislador Triple Péndulo de Fricción, (W. J. McVitty & M. C. Constantinou, 2015)

Geometría del aislador de triple péndulo, indicando cada elemento que lo conforma con la nomenclatura a ser utilizada. (Ver figura 9)

Adicional a estas propiedades también es importante definir los diámetros de los elementos del aislador, como son: D_R , diámetro del cuerpo deslizador; D_S , diámetro de las placas internas 2 y 3, y D_C , diámetro de la placa 1 y 4.

En el año 2008, (Daniel M. Fenz and Michael C. Constantinou, 2008), demostraron teórica y experimentalmente la relación fuerza-desplazamiento, del aislador FPT, con lo cual se determinó que este tipo de aisladores cuentan con 5 fases de movimiento, las cuales varían en función del deslizamiento del cuerpo rígido por las diferentes placas cóncavas.

En las fases de movimiento, se pretende demostrar, que la rigidez del elemento está en función de los radios efectivos de curvatura. Como se explicó con anterioridad los radios de curvatura $R_{ef1} = R_{ef4}$ y $R_{ef2} = R_{ef3}$, por lo tanto, la rigidez de la Fase II es igual a la rigidez de la Fase IV, mientras que la rigidez de la Fase I coincide con la rigidez de la Fase V.

FASE	DIAGRAMA	RELACIÓN FUERZA-DESPLAZAMIENTO
I		<p data-bbox="884 891 1339 925">Deslizamiento sobre la placa 2 y 3</p> 
II		<p data-bbox="815 1379 1410 1447">Se detiene el movimiento en las placas 2 y 3, y se desliza en las placas 1 y 4.</p> 

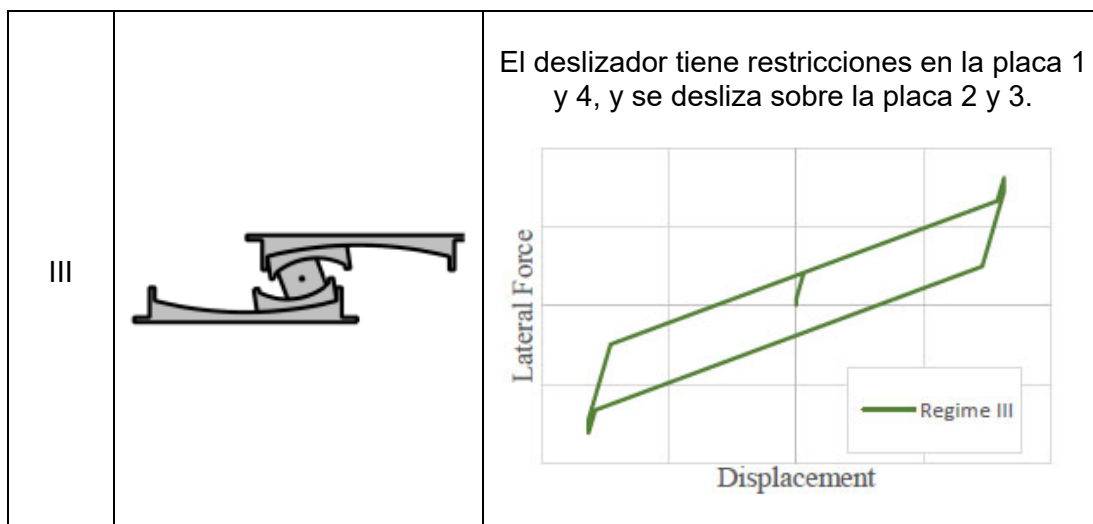


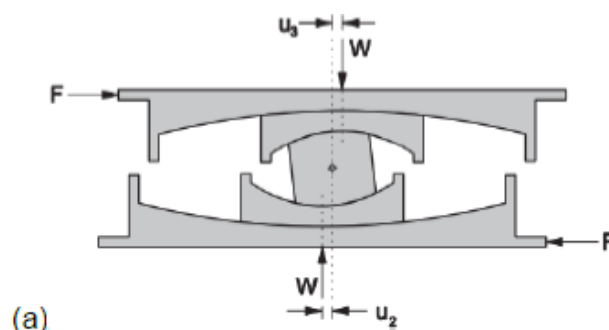
Tabla 1. Esquema relación Fuerza-Desplazamiento (W. J. McVitty & M. C. Constantinou, 2015)

2.2.3.1. Fase de Movimiento I

Se conoce como Fase de Movimiento I, cuando existe deslizamiento del cuerpo rígido en la placa 2 y 3.

En el Figura que antecede, se puede apreciar que la Fase I, inicia cuando la fuerza F , supera a la fuerza de fricción de las superficies $F_{f_2} = F_{f_3}$, por lo tanto, se desliza de manera simultánea en las dos placas.

El Diagrama de cuerpo libre (FBD, Siglas en ingles) y la posición deformada de la Fase de Movimiento I se encuentran en la figura 10, la misma que permite demostrar la relación fuerza-desplazamiento ($F-u$) del aislador FPT.



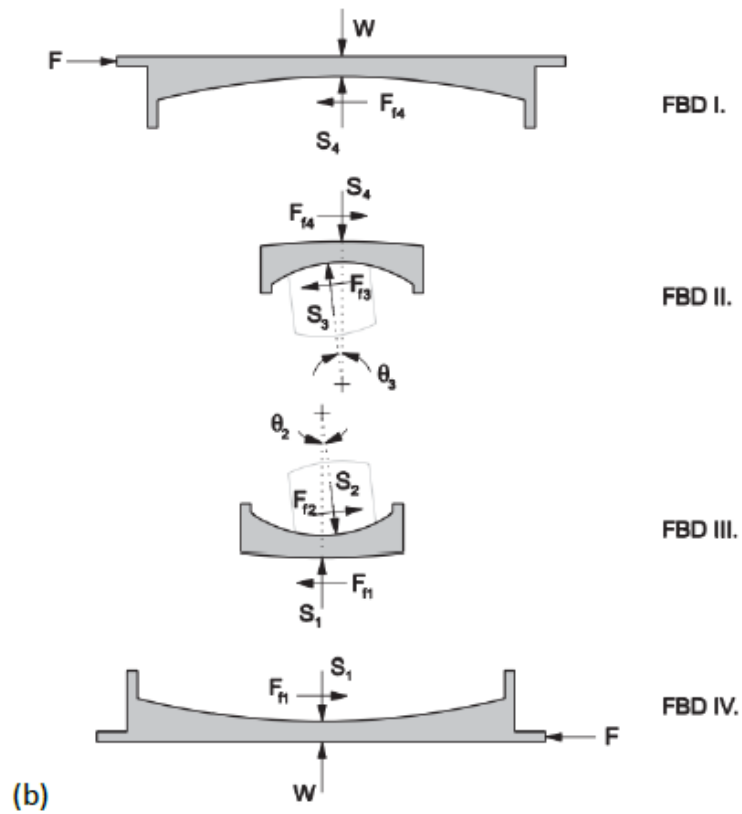


Figura 10. Diagrama de cuerpo libre – Fase de Movimiento I (Daniel M. Fenz and Michael C. Constantinou, 2008)

Diagrama de cuerpo libre en la fase de movimiento 1, se indica el comportamiento de cada elemento del aislador mientras se produce esta etapa de movimiento. (Ver figura 10)

Realizando equilibrio en las fuerzas tanto en x como en y, se tiene lo siguiente:

$$\sum Fx = 0, F_{f2} \cdot \cos\theta_2 + S_2 \cdot \text{sen}\theta_2 - F_{f1} = 0 \quad (\text{Eq.19})$$

$$\sum Fy = 0, S_1 + F_{f2} \cdot \text{sen}\theta_2 - S_2 \cdot \cos\theta_2 = 0 \quad (\text{Eq.20})$$

Despejando S_2 , de Eq.19,

$$S_2 = \frac{F_{f1} - F_{f2} \cdot \cos\theta_2}{\text{sen}\theta_2} \quad (\text{Eq.21})$$

Por geometría se conoce,

$$u_2 = R_{ef2} \cdot \text{sen}\theta_2 \quad (\text{Eq.21})$$

De FBD,

$$F = F_{f1} \quad (\text{Eq.22})$$

$$W = S_1 \quad (\text{Eq.23})$$

Al usar Eq.21, Eq.22 y Eq. 23 en Eq. 20, y despejando F, se obtiene.

$$F = W \frac{\text{sen}\theta_2}{\text{cos}\theta_2} + \frac{F_f}{\text{cos}\theta_2} \quad (\text{Eq.24})$$

Se conoce que el radio de curvatura R_2 , es relativamente más grande que el desplazamiento horizontal, por lo tanto, se considera que $\text{cos}\theta_2$ es igual a 1. Bajo esta premisa, se puede conocer F, para la superficie 2 y 3.

$$F = \frac{W}{R_{ef2}} u_2 + F_{f2} \quad (\text{Eq. 25})$$

$$F = \frac{W}{R_{ef2}} u_2 + F_{f2} \quad (\text{Eq. 26})$$

El desplazamiento total, al ocurrir de manera simultánea,

$$u = u_2 + u_3 \quad (\text{Eq.27})$$

Al combinar las ecuaciones 25, 26, y 27, se obtiene la ecuación general de la fase I, demostrando que la rigidez en esta fase es inversamente proporcional a a suma de los radios de las placas 2 y 3.

$$F = \frac{W}{R_{ef2} + R_{ef3}} + \frac{F_{f2}R_{ef2} + F_{f3}R_{ef3}}{R_{ef2} + R_{ef3}} \quad (\text{Eq.28})$$

La curva de histéresis que se presenta en la fase I, se basa en la Eq. 28, la misma que es válida para valores de desplazamientos u , menores al límite u^* , el mismo que es el desplazamiento de transición entre la Fase I y Fase II.

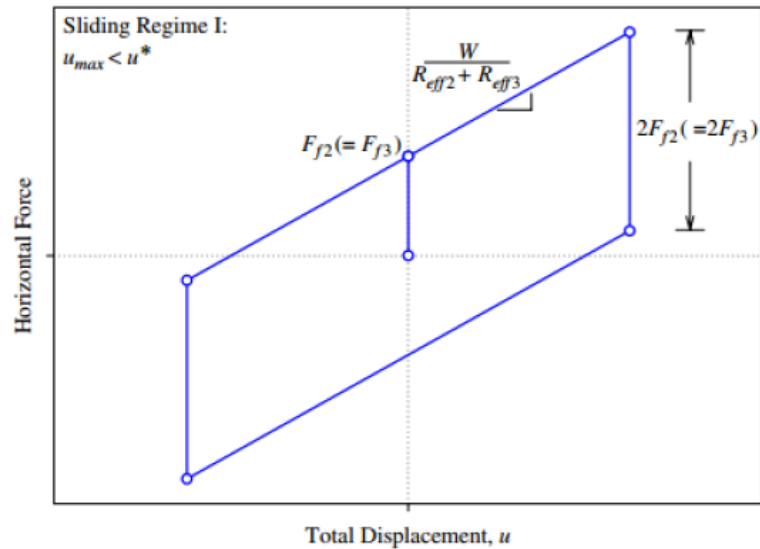


Figura 11. Curva de histéresis Fase I, (Daniel M. Fenz and Michael C. Constantinou, 2008)

Gráfica fuerza vs desplazamiento del comportamiento del aislador en la fase de movimiento 1. (Ver figura 11)

2.2.3.2. Fase de Movimiento II

En esta fase de movimiento, se genera el primer aumento del periodo, al superar el límite de desplazamiento u^* , lo cual quiere decir que $F \geq Ff_1$.

En esta fase de movimiento, se mantiene el deslizamiento de la placa 3, pero se detiene el deslizamiento de la placa 2, además, se activa el desplazamiento de la placa 1.

En la figura 12, se muestra el diagrama de cuerpo libre que se genera en la Fase de movimiento II, y la posición deformada del aislador.

La relación fuerza-desplazamiento, se la determina partiendo de,

$$u_1 = R_{ef1} \cdot \text{sen}\theta_1 \quad (\text{Eq.29})$$

$$u_2 = R_{ef2} \cdot \text{sen}\theta_2 \quad (\text{Eq.30})$$

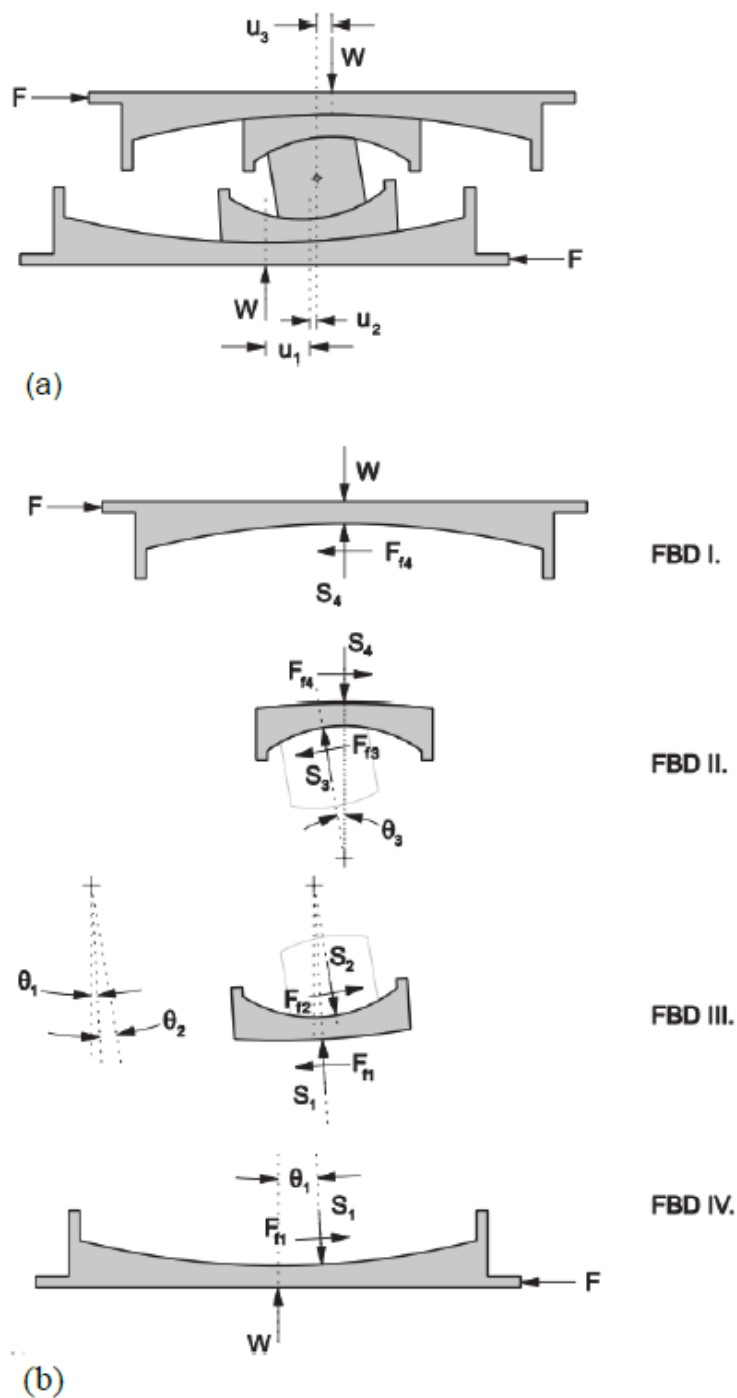


Figura 12. Diagrama de Cuerpo Libre – Fase II. (Daniel M. Fenz and Michael C. Constantinou, 2008)

Diagrama de cuerpo libre en la fase de movimiento 2, se indica el comportamiento de cada elemento del aislador mientras se produce esta etapa de movimiento. (Ver figura 12)

Utilizando lo expuesto en, (Daniel M. Fenz and Michael C. Constantinou, 2008),

$$\sum Fx = 0, S_1 \cdot \text{sen}\theta_1 + F_{f1} \cdot \text{cos}\theta_1 - F = 0 \quad (\text{Eq.31})$$

$$\sum Fy = 0, W + F_{f1} \cdot \text{sen}\theta_1 - S_1 \cdot \text{cos}\theta_1 = 0 \quad (\text{Eq.32})$$

Para la superficie 1, se utiliza la demostración aplicada en la Eq.25

$$F = \frac{W}{R_{ef1}} u_1 + F_{f1} \quad (\text{Eq.33})$$

En la placa 2, se deben combinar las ecuaciones expuestas con anterioridad, asumiendo que los ángulos que se forman son muy pequeños, obteniendo así, que $\text{cos } \theta_1 = \text{cos } \theta_2 = 1$ y que $\text{sen } \theta_1 \times \text{sen } \theta_2 = 0$

$$F = w \left(\frac{u_1}{R_{ef1}} + \frac{u_2}{R_{ef2}} \right) + F_{f2} \quad (\text{Eq.34})$$

Al igualar las ecuaciones 33 y 34, se puede determinar que se detiene el desplazamiento de la placa 2, pues el resultado obtenido es un valor constante (Eq.35). Adicional, al comparar los diagramas de cuerpo libre de la Fase I y Fase II, (FBD II), tiene el mismo comportamiento, por lo que, el deslizamiento de la placa 3, viene dado por la ecuación 26.

$$u_2 = (u_1 - u_2) * R_{ef2} \quad (\text{Eq.35})$$

El desplazamiento total de la fase II es,

$$u = u_1 + u_2 + u_3 \quad (\text{Eq.36})$$

Obteniendo que, la ecuación general que representa la relación fuerza-desplazamiento está definida en la Eq. 37, la misma que demuestra que la rigidez de la fase II, es inversamente proporcional a la suma de los radios de las placas 1 y 3, ya que no existe deslizamiento en la placa 2.

$$F = \frac{W}{R_{ef1} + R_{ef3}} u + \frac{F_{f1}(R_{ef1} - R_{ef2}) + F_{f2}R_{ef2} + F_{f3}R_{ef3}}{R_{ef1} + R_{ef3}} \quad (\text{Eq.37})$$

La curva de histéresis de la fase II, es válida para desplazamientos que estén por debajo de los permitidos entre la fase II y la fase III del aislador. Este desplazamiento se lo denomina u^{**}

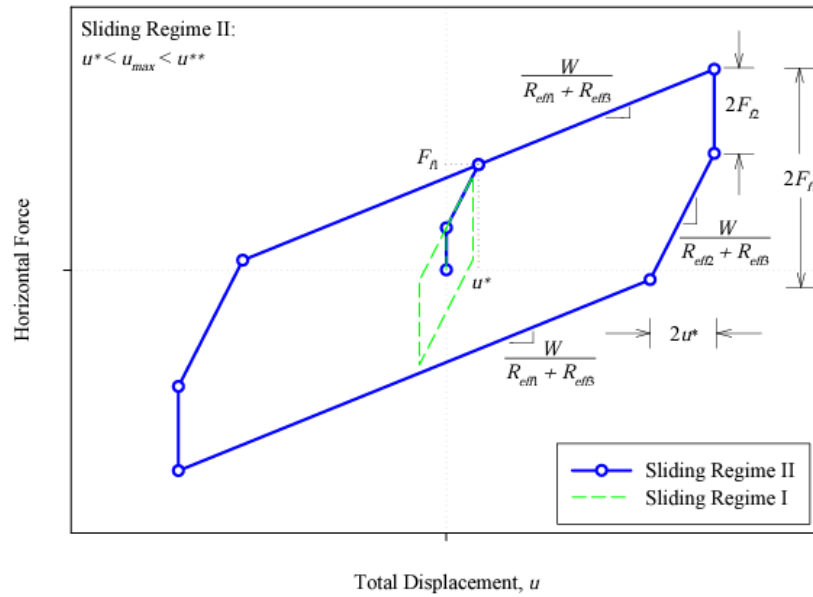


Figura 13. Curva de histéresis Fase II, (Daniel M. Fenz and Michael C. Constantinou, 2008)

Curva de histéresis en la relación fuerza versus desplazamiento del aislador de triple péndulo en la fase de movimiento II. (Ver figura 13)

2.2.3.3. Fase de Movimiento III

La Fase de Movimiento III, empieza una vez que el desplazamiento u , es mayor al desplazamiento u^{**} , el mismo que limitaba el desplazamiento en la fase II.

Las características principales de esta fase son, que en la placa 1 continua el movimiento, mientras que la placa 2 mantiene detenido su movimiento.

Adicional, mientras la placa 3 detiene su deslizamiento, la placa 4 activa el suyo.

Para demostrar la relación fuerza-desplazamiento se parte de:

- La ecuación de movimiento de la placa 1 es la indicada en la Eq.33
- La ecuación de movimiento de la placa 2 es la indicada en la Eq.34
- La ecuación de movimiento de la placa 4 se usa la demostración aplicada en la Eq.25

$$F = \frac{W}{R_{ef4}}u + F_{f4} \quad (\text{Eq.38})$$

La ecuación de movimiento de la placa 3 se usa la demostración aplicada en la Eq.25

$$F = W\left(\frac{u_3}{R_{ef3}} + \frac{u_4}{R_{ef4}}\right) + F_{f3} \quad (\text{Eq.39})$$

Los desplazamientos de la placa 3 y la placa 4, vienen dados por,

$$u_3 = R_{ef3} \cdot \text{sen}\theta_3 \quad (\text{Eq.40})$$

$$u_4 = R_{ef4} \cdot \text{sen}\theta_4 \quad (\text{Eq.41})$$

Al igualar las ecuaciones Eq.38 y Eq.39, y dejando en términos de u_3 ,

$$u_3 = (u_4 - u_3) * R_{ef3} \quad (\text{Eq.42})$$

Cuando se ha detenido el movimiento en la placa 3, se conoce que el desplazamiento total de la fase III viene dado por,

$$u = u_1 + u_2 + u_3 + u_4 \quad (\text{Eq.43})$$

Por lo tanto, al combinar las ecuaciones de movimiento de cada placa, se obtiene la ecuación general que describe la Fase III, teniendo como resultado que la rigidez es inversamente proporcional a la suma de los radios efectivos de las placas 1 y 4.

Se demuestra, además, que la rigidez en la fase III es menor a la obtenida en la fase II, por lo que, la pendiente en la curva de histéresis es menor. (Puchaicela, 2018).

$$F = \frac{W}{R_{ef1} + R_{ef4}} u + \frac{F_{f1}(R_{ef1} - R_{ef2}) + F_{f2}R_{ef2} + F_{f3}R_{ef3} + F_{f4}(R_{ef4} - R_{ef3})}{R_{ef1} + R_{ef4}} \quad (\text{Eq.44})$$

La curva de histéresis de la fase III, es válida para desplazamientos que estén por debajo de los permitidos entre la fase III y la fase IV del aislador, y se lo conoce como u_{dr1} . Este desplazamiento se termina una vez que la placa 1 detiene por completo su movimiento, al chocar el deslizador con el anillo de retención.

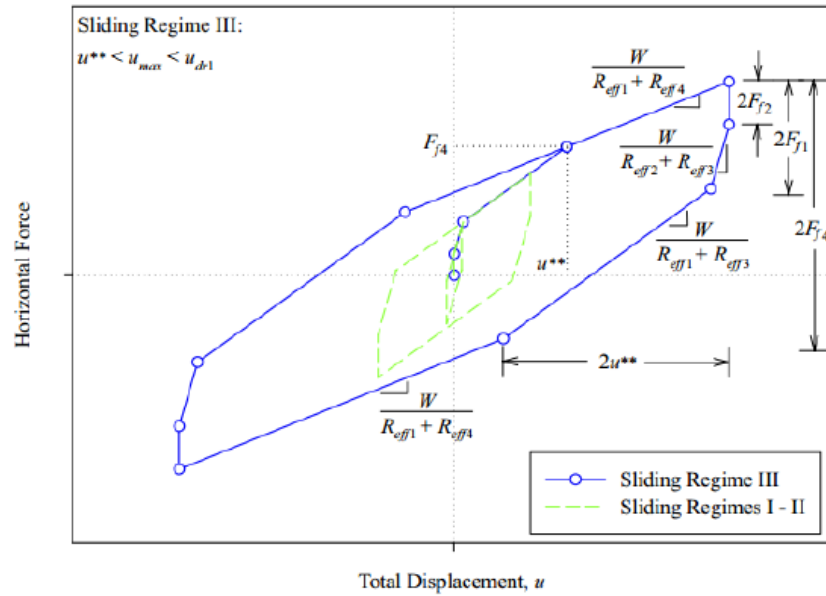


Figura 14. Curva de Histéresis Fase III, (Daniel M. Fenz and Michael C. Constantinou, 2008)

Curva de histéresis en la relación fuerza versus desplazamiento del aislador de triple péndulo en la fase de movimiento III. (Ver figura 14)

2.2.3.4. Fase de Movimiento IV

La fase de movimiento IV, empieza cuando el desplazamiento de esta fase supera el u_{dr1} .

Esta Fase se caracteriza por las siguientes características:

- El deslizamiento de la placa 1 se detiene
- La placa 2, empieza su movimiento nuevamente
- El deslizamiento de la placa 3, se detiene
- El deslizamiento de la placa 4, continua con su movimiento.

La relación fuerza-desplazamiento, en la fase IV, se determina partiendo del análisis del diagrama de cuerpo libre que se muestra en la figura 15, de donde se obtiene la ecuación de movimiento de la placa 1.

$$F = \frac{W}{R_{ef1}} d_1 + F_{f1} + F_{r1} \quad (\text{Eq.45})$$

El termino F_{r1} , se obtiene al chocar la placa 2 con el anillo de retención de la placa 1, de igual manera, este resultado se obtiene del análisis del diagrama de cuerpo libre de la figura 15.

La ecuación de movimiento de la placa 2, se mantiene tanto en la Fase II como en la Fase III, por lo que se puede usar de base la ecuación Eq.25, con la diferencia

que ahora u_1 , será igual a d_1 , cumpliendo de esta manera que la placa 2, restringe su movimiento al chocar con el anillo de retención de la placa 1.

$$F = W\left(\frac{d_1}{R_{ef1}} + \frac{u_2}{R_{ef2}}\right) + F_{f2} \quad (\text{Eq.46})$$

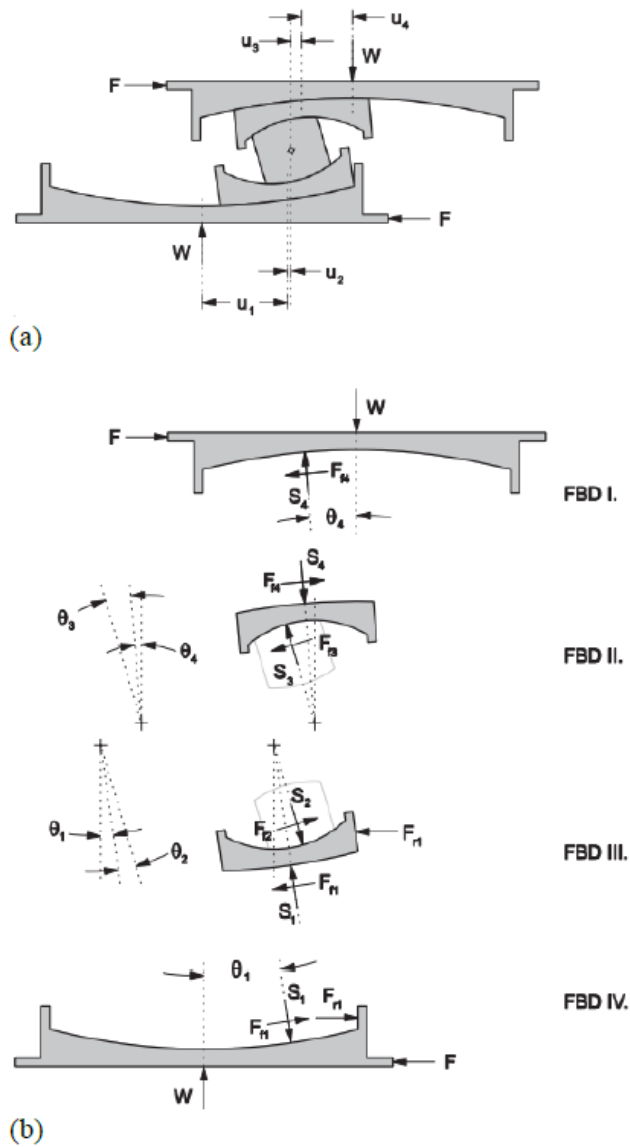


Figura 15. Diagrama de Cuerpo Libre – Fase IV. (Daniel M. Fenz and Michael C. Constantinou, 2008)

Diagrama de cuerpo libre en la fase de movimiento 2, se indica el comportamiento de cada elemento del aislador mientras se produce esta etapa de movimiento. (Ver figura 15)

En la Fase de movimiento IV, la ecuación que define el desplazamiento total es la Eq.43, por lo que el desplazamiento total tanto en la fase III y fase IV, es el mismo.

Adicional, se mantienen algunas condiciones de movimiento de la fase III, por lo tanto, las ecuaciones de deslizamiento de la placa 3 y 4, vienen dadas por Eq.38 y Eq.39.

Al combinar todas las ecuaciones de movimiento de cada placa, con el desplazamiento total de la fase IV, la ecuación general, que determina la relación fuerza-desplazamiento es,

$$F = \frac{W}{R_{ef2} + R_{ef4}} (u - u_{dr1}) + \frac{W}{R_{ef1}} d_1 + F_{f1} \quad (\text{Eq.47})$$

La curva de histéresis de la fase IV, representa el límite de desplazamiento, el cual se conoce como u_{dr4} y representa el desplazamiento que existe entre la fase IV y V, este desplazamiento límite se da cuando la placa 3, choca con el anillo de retención de la placa 4.

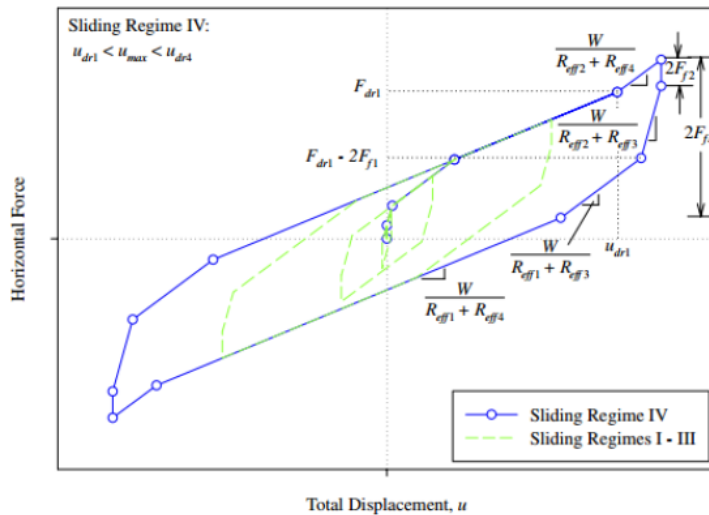


Figura 16. Curva de histéresis Fase IV, (Daniel M. Fenz and Michael C. Constantinou, 2008)

Curva de histéresis en la relación fuerza versus desplazamiento del aislador de triple péndulo en la fase de movimiento IV. (Ver figura 16)

2.2.3.5. Fase de Movimiento V

La fase de movimiento V, es la última fase de movimiento del aislador de triple péndulo, esta inicia cuando el desplazamiento es mayor al permitido en la fase IV.

Las principales características de esta fase son:

- El deslizamiento de la placa 1 se detiene
- La placa 2, empieza su movimiento nuevamente
- El deslizamiento de la placa 3, se re activa
- El deslizamiento de la placa 4, se detiene

Cuando se da el choque de la placa 3, en el anillo de retención de la placa 4, se genera la fuerza F_{r4} , la misma que al igual que en la Fase IV, viene dada por la ecuación Eq.45, en la cual se reemplaza F_{r1} por F_{r4} .

$$F = \frac{W}{R_{ef4}} d_4 + F_{f4} + F_{r4} \quad (\text{Eq.48})$$

La ecuación de la placa 3, está definida por la ecuación Eq.47, con la variación de $u_4=d_4$.

$$F = W \left(\frac{d_4}{R_{ef4}} + \frac{u_3}{R_{ef3}} \right) + F_{f3} \quad (\text{Eq.49})$$

Al combinar, todas las ecuaciones de movimiento de las placas del aislador, se tiene como resultado, la ecuación general,

$$F = \frac{W}{R_{ef2} + R_{ef3}} (u - u_{dr4}) + \frac{W}{R_{ef4}} d_4 + F_{f4} \quad (\text{Eq.50})$$

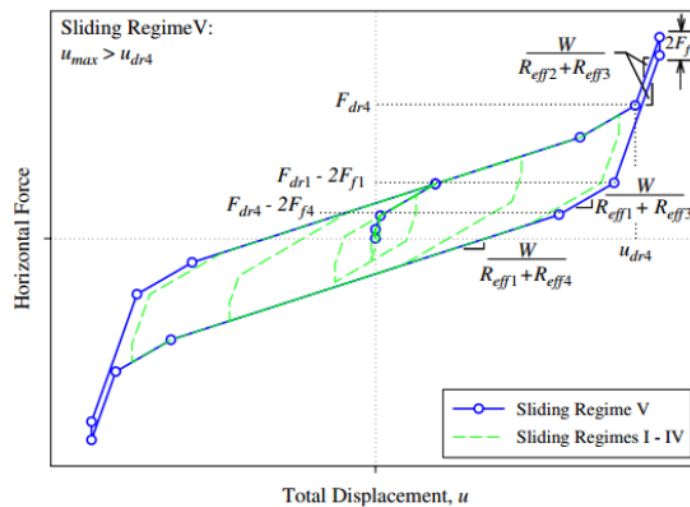


Figura 17. Curva de histéresis Fase V (Daniel M. Fenz and Michael C. Constantinou, 2008)

Curva de histéresis en la relación fuerza versus desplazamiento del aislador de triple péndulo en la fase de movimiento IV. (Ver figura 17)

La curva de histéresis de la fase V, representa el máximo desplazamiento que tiene el aislador de triple péndulo, el mismo que se conoce como u_{max} .

Bajo esta premisa, se puede decir que, si se cumple la condición que $d_1=d_4$ y $d_2=d_3$, la capacidad del aislador viene dada por la suma de cada una de las capacidades de cada placa, teniendo así,

$$\sum_{i=1}^4 \frac{R_{efi}}{R_i} d_i \quad (\text{Eq.51})$$

Debido a que los aisladores no solo se trasladan, sino que a su vez rotan, el término $\frac{R_{efi}}{R_i}$ reduce la capacidad de desplazamiento del mismo. (Puchaicela, 2018)

CAPÍTULO 3

3. DISEÑO DEL AISLADOR DE TRIPLE PÉNDULO FPT

Los aisladores de fricción de triple péndulo, como principio, se conoce que son una serie de placas que se deslizan unas sobre otras de tal manera que regresan a su posición inicial, gracias a esta propiedad adquieren el nombre de péndulo.

Estas placas poseen curvaturas y coeficientes de fricción que controlan los movimientos laterales del terreno producidos por el efecto de los sismos hacia la estructura.

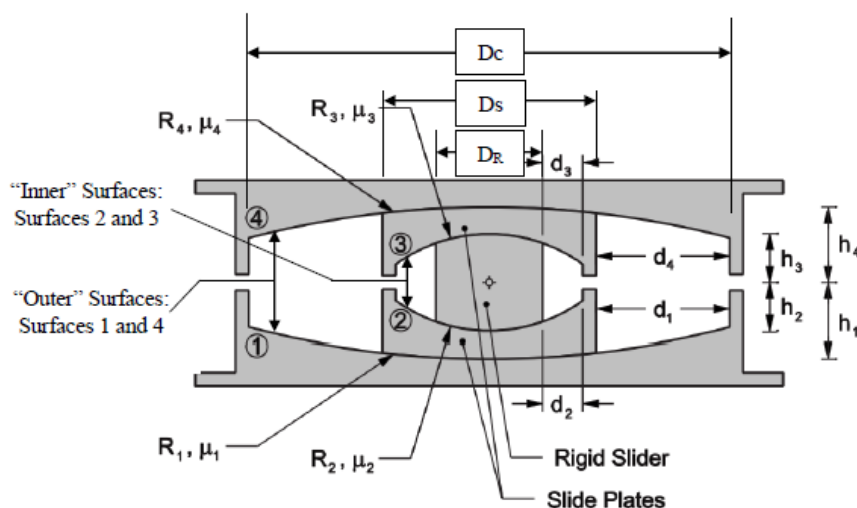


Figura 18. Aislador Triple Péndulo de Fricción, (W. J. McVitty & M. C. Constantinou, 2015)

Geometría del aislador triple péndulo, indicando la nomenclatura de cada uno de los elementos que lo conforman y sus diferentes propiedades tanto de las placas como dispositivo deslizador rígido metálico. (Ver figura 18)

Los aisladores de triple péndulo tienen varios parámetros que definen su geometría y propiedades, consta de 5 elementos principales, 4 placas cóncavas y un elemento deslizador rígido metálico.

Adicional, dispone de 4 coeficientes de fricción y distancias límites al borde de las placas en las que se encuentra el límite deslizador.

En la sección 2.2.3. del presente documento, se estableció las condiciones que este tipo de aisladores debe cumplir para formar parte del diseño estándar SIS, se incluye, además, en este capítulo los requerimientos mínimos que estipula la norma americana ASCE 7-22, en estructuras con base aislada.

Para llegar al diseño final de los aisladores de triple péndulo se deberá seguir el siguiente procedimiento: (Puchaicela, 2018)

1. Objetivos de diseño, definidos en función del desempeño deseado, el uso que tendrá la edificación y las características estructurales de la misma.
2. Definir la Ubicación de los aisladores, de tal manera que cada uno de estos reciban carga axial similar en todos los puntos.
3. Realizar un diseño preliminar del aislador basándose en el método de fuerza lateral equivalente (ELF-ASCE 7-22) y en lo expuesto en (Chávez, 2006).
4. Contactar con el fabricante, con el fin de obtener las propiedades de un aislador comercial, el mismo que cuenta con verificaciones experimentales de los factores de fricción.
5. Análisis sísmico de la estructura (CENTRO DE INVESTIGACIÓN DE SALUD DE AMÉRICA LATINA DE LA PUCE), con base aislada, determinando fuerzas axiales, desplazamientos y cortantes basales en el sistema aislado. Este análisis se realiza en el capítulo 4 del presente documento.
6. Resultados del Análisis, en esta etapa se verifica si el aislador escogido en el diseño cumple con la capacidad de desplazamiento requerido, así como su resistencia a fuerzas axiales y de corte. La verificación de resultados se realiza en el capítulo 5.

3.1. Objetivos de Diseño

Los objetivos de diseño, determinan el comportamiento que se desea conseguir de una edificación al estar sometida a cargas laterales por efectos del sismo.

En la norma ecuatoriana de la construcción NEC-2015, establece como objetivo de diseño, el evitar el colapso de las estructuras con el fin de precautelar la vida de sus ocupantes, sin embargo, no se establece parámetros que nos permitan mantener la funcionalidad de la estructura una vez suscitado el sismo.

Los objetivos de diseño deben ser establecidos en función del uso de la estructura, el desempeño que se pretende alcanzar y las características estructurales de la misma.

Si, la estructura a ser analizada es de uso esencial, por ejemplo, un hospital, se necesita que se mantenga operativa durante y después del evento sísmico, por lo tanto, los objetivos de diseño deben controlar los daños de la estructura tanto de los elementos estructurales, como no estructurales, dando un análisis especial a los máximos desplazamientos que se puedan presentar.

En la norma americana ASCE 7-22, no se definen objetivos de diseño basándose en la prevención de daño, sin embargo, en el Capítulo 17 – Estructuras con base aislada-, se limita la respuesta inelástica de la superestructura y se controlan las derivas de piso, generando así un control de los daños en la misma. (Puchaicela, 2018)

Si el proyecto plantea, niveles de desempeño sísmico más avanzados, permitiendo funcionalidad en la estructura después de ocurrir un evento sísmico, se puede utilizar los objetivos de diseño planteados en (Zayas, V., & Mahin, S., 2010), mismos que permiten controlar los daños en los elementos estructurales, no estructurales y en los contenidos de la edificación.

Los objetivos de diseño que plantean (Zayas, V., & Mahin, S., 2010), se presentan en la Tabla 2.

Parámetro de diseño para componentes estructurales, no estructurales, y contenidos en función de la probabilidad de terremoto. Ocurrencia y probabilidad de ser excedido	Terremoto con un 2% de probabilidad de superarse en 50 años (período de retorno de 2500 años)	Terremoto con un 10% de probabilidad de superarse en 50 años (período de retorno de 500 años)	Se espera que el terremoto se produzca tres veces en 50 años (período de retorno de 16 años)
Factores de diseño de estructuras para prevenir de forma confiable daños en la estructura, teniendo en cuenta los efectos de las imperfecciones de la construcción, irregularidades de la estructura, asimetrías y limitaciones y errores de modelado y diseño.	Factor de resistencia elástica de seguridad = 1.0, contra la fuerza sísmica calculada demanda factor de reducción de diseño sísmico, $R_w = 1.0$ máx.	Factor de resistencia elástica de seguridad = 1.3, contra la fuerza sísmica calculada demanda factor de reducción de diseño sísmico, $R_w = 0.75$ máx	Factor de resistencia elástica de seguridad = 2.0, contra la fuerza sísmica calculada demanda factor de reducción de diseño sísmico, $R_w = 0.5$ máx.
Evite daños a componentes y contenidos no estructurales, que están dañados por desplazamientos estructurales laterales. Limita los desplazamientos laterales a un porcentaje de altura de historia, deriva de historia%.	Story Drift = 1.0 %. Maximo. (Deriva de piso)	Story Drift = 0.75%. Maximo. (Deriva de piso)	Story Drift = 0.5 %. Maximo. (Deriva de piso)

Tabla 2. Parámetros de diseño para evitar daños y mantener funcional la estructura, los componentes no estructurales, y los contenidos (Zayas, V., & Mahin, S., 2010)

Continuación...

<p>Evite daños a componentes y contenidos no estructurales que estén dañados por la aceleración de la estructura, las velocidades y los desplazamientos absolutos del piso.</p>	<p>FSa 0.5 = 0.7g, aceleración máxima de los espectros de piso límite en el segundo período, FSa0.5</p>	<p>FSa 0.5 = 0.6g, aceleración máxima de los espectros de piso límite en el segundo período, FSa0.5</p>	<p>FSa 0.5 = 0.5g, aceleración máxima de los espectros de piso límite en el segundo período, FSa0.5</p>
---	---	---	---

Tabla 3. Parámetros de diseño para evitar daños y mantener funcional la estructura, los componentes no estructurales, y los contenidos (Zayas, V., & Mahin, S., 2010)

3.2. Ubicación de los aisladores

El identificar la ubicación correcta de los aisladores tanto en planta, como en elevación difiere en cada proyecto en función de la geometría e irregularidades, de la estructura.

Colocar los aisladores en la edificación en elevación se conoce como, interfaz de aislación, y existen varios criterios a ser utilizados para ubicarlos de la manera más óptima en cada estructura.

- Ubicación en planta.

Como primicia, se debe ubicar los aisladores en planta, de tal manera que la fuerza axial que resiste cada aislador sea similar, logrando así, que todos los aisladores tengan la misma capacidad axial.

Los aisladores a ser ubicados en planta, también deben considerar la configuración estructural de la edificación, por ejemplo, en una estructura que solo tiene columnas, es recomendable colocar aisladores en la base de cada columna, tratando de mantener el mismo tipo de aislador en toda la estructura. Sin embargo, si la estructura dispone de muros, los aisladores deben colocarse a lo largo del muro, por lo que es posible que se necesite usar dos o más tipos de aisladores.

Es importante mencionar, que no es recomendable el uso de un sistema de aislación sísmica cuando existen muros, pues se puede producir una concentración de esfuerzos en los aisladores ubicados debajo de los muros.

- Ubicación en elevación (interfaz de aislación)

La ubicación de los aisladores en elevación, puede ser de tres maneras ya propuestas en (Zayas, V., Low, S., & Mahin, S., 1990).

Como primera opción, si no se tiene irregularidad en elevación se recomienda colocar los aisladores entre la cimentación y la losa del primer piso. Otra alternativa, es colocar los aisladores en la base de cada columna.

Cuando la estructura no presenta regularidad en elevación, es recomendable identificar el piso que presente regularidad y colocar los aisladores en la parte superior de la columna, por debajo del piso donde empezará el sistema de aislación.



Figura 19. Ubicación en planta de aisladores en el Hospital Okmeydani and Goztepe, Turquía. (Protection, 2021)

Disposición de los aisladores de triple péndulo en planta, cimentación aislada del Hospital Okmeydani and Goztepe en Turquía, esta estructura después del terremoto de Turquía, el 6 de febrero del 2023, no sufrió daños importantes, y mantuvo continua su funcionalidad. (Ver figura 19)

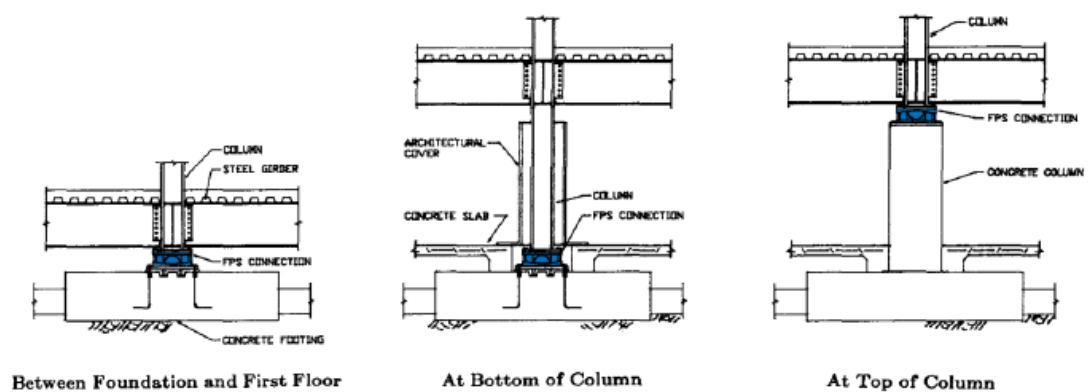


Figura 20. Ubicación de aisladores en elevación. (Puchaicela, 2018) (Zayas, V., Low, S., & Mahin, S., 1990)

La ubicación de los aisladores en planta puedes tener varias soluciones, dependiendo de las condiciones y geometría de la estructura a ser analizada. (Ver figura 20)

3.3. Diseño preliminar de los aisladores de triple péndulo de fricción

3.3.1. Método Fuerza lateral equivalente ASCE 7-22

Se conoce que los aisladores de triple péndulo, para que formen parte del diseño estándar debe cumplir ciertas características en sus propiedades geométricas, tales como: (Puchaicela, 2018)

- Altura entre placas externas; $h_1=h_4$
 - Altura entre placas internas; $h_3=h_2$
 - Radio de curvatura de superficies externas; $R_1=R_4$
 - Radio de curvatura de superficies internas; $R_2=R_3$
 - Coeficiente de fricción en las placas externas; $\mu_1 \leq \mu_4$
 - Coeficiente de fricción en las placas internas; $\mu_2 = \mu_3$
- a. Cálculo de Alturas y D_R (Diámetro del deslizador rígido): La estabilidad del aislador se logra garantizar cuando la relación del aspecto del deslizador rígido es menor que 1.0, por lo tanto:

$$\frac{h_2 + h_3}{D_R} \leq 1.0$$

$$A_R \geq \frac{P}{\sigma_{max}}$$

$$D_R \geq \sqrt{\frac{4A_R}{\pi}}$$

Donde:

P: Fuerza axial máxima en columna, incluye efectos sísmicos

σ_{max} : Esfuerzo máximo (60 ksi)

El espesor de las placas internas debe ser de al menos 1 pulgada, teniendo así:

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

b. Cálculo Radios de Curvatura:

Para el cálculo de los radios de curvatura se debe partir de la primicia que:

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

R1=R4; los radios de curvatura de las placas externas deben estar acorde a lo expuesto en la tabla 3 del presente documento.

R2=R3; En cuanto, a los valores del radio de curvatura de las placas internas, no se dispone una tabla de ayuda, sin embargo, se conoce que los valores posibles son: 5.5, 12, 23 y 33 pulgadas.

Respecto a los valores posibles de Dc (diámetro de las superficies cóncavas externas), se los puede encontrar en la Tabla 4, mientras que los valores Ds (diámetro de las superficies cóncavas internas), oscilan entre 6 a 65 pulgadas.

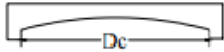
Id.	Radio de curvatura ($R_1 = R_4$) (in)	Diámetro de las superficies cóncavas (D_c) (in)
		
1	61	14
2		18
3		22
4		31
5	88	36
6		27
7		31
8		33
9		36
10		39
11		41
12		44
13		46
14		51
15	56	
16	120	27
17		56
18	156	63
19		70
20		106
21		124
22	238	78
23		94
24		106
25		131
26		143

Tabla 4. Valores de R1-R4, (Constantinou, M., Whittaker, A., Kalpakidis, Y., Fenz, D., & Warn, G., 2007)

c. Coeficientes de fricción

Los coeficientes de fricción, por lo general son tomados a partir del diseño de los fabricantes de los aisladores, sin embargo, se puede tener valores referenciales conociendo los rangos de variación que se puede admitir.

- Coeficiente de fricción en las superficies externas

Este parámetro es el más influyente en cuanto al comportamiento de la estructura, en términos de cortante y desplazamientos, pues son los encargados de disipar la energía que se produce al ocurrir un evento sísmico.

El rango de variación oscila entre el 3% y 10%.

- Coeficiente de fricción en las superficies internas

Este parámetro oscila entre valores de 1% y 2%, por lo tanto, la influencia del mismo dentro de la estructura no es muy significativa, sin embargo, toma importancia al analizar las aceleraciones de piso.

Los coeficientes de fricción, son determinados tanto para el límite superior como inferior, un valor aproximado de los coeficientes de fricción de este tipo de aisladores se obtiene utilizando las ecuaciones planteadas en (Constantinou, M., Whittaker, A., Kalpakidis, Y., Fenz, D., & Warn, G., 2007), las cuales son tomadas cuando el aislador está trabajando en la fase de movimiento III. Es importante conocer, que los valores de las siguientes ecuaciones están en ksi.

- Límite inferior:

$$\mu_{3c} = 0.122 - 0.01\rho$$

Donde, ρ representa la presión que se ejerce sobre las superficies en contacto.

$$\rho = \frac{P_u}{A}$$

Donde, P_u = Carga sobre el aislador

A = Área de contacto del deslizador rígido.

Por efectos de velocidad, el coeficiente de fricción debe ajustar su valor restando un valor de 0.015.

$$\mu_{3c} = 0.122 - 0.01\rho - 0.015$$

- Límite Superior

$$\mu_{1c} = 1.20\mu_{3c} * \lambda_{max}$$

(Constantinou, M., Whittaker, A., Kalpakidis, Y., Fenz, D., & Warn, G., 2007), han determinado tablas de los valores de corrección de los coeficientes de fricción por desplazamiento, temperatura, contaminación y envejecimiento conocidos como λ .

Los coeficientes de fricción de las placas internas siempre deben ser menores a los coeficientes de fricción de las placas externas, siempre se desliza la parte interna primero y después la parte externa.

d. Dimensiones en Planta y capacidad de desplazamiento

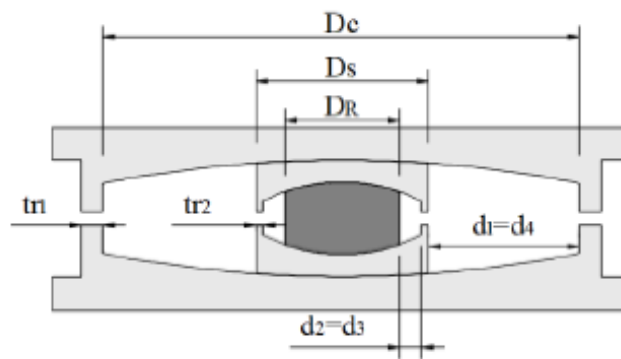


Figura 21. Nomenclatura del aislador FTP – Diámetros y desplazamientos (Puchaicela, 2018)

Geometría del aislador, se indica la nomenclatura de las distancias máximas de desplazamiento y deslizamiento que tiene el cuerpo rígido metálico que forma parte del aislador de triple péndulo, así como las placas internas del mismo. (Ver figura 21)

El diámetro de la placa interna del aislador D_s , viene dado por la siguiente expresión:

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

Donde, tr_2 , representa el espesor del anillo de retención de la placa 2. Se asume un valor de pulgadas.

El diámetro de la placa externa D_c , viene dado por la siguiente expresión:

$$D_c = D_s + d_1 + d_4$$

Los valores de D_s y D_c , pueden ser obtenidos por medio del fabricante, utilizando así datos reales que se encuentran dentro del mercado.

Para el cálculo de desplazamientos se tiene:

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

$$d_2 = d_3 = \frac{D_s - D_R - 2t_{r2}}{2}$$

Una vez determinadas las propiedades geométricas del aislador, se procede con la aplicación de las ecuaciones planteadas en el código americano ASCE 7-22:

- **Cálculo desplazamiento máximo**

Para conocer el desplazamiento máximo que puede tener la estructura, es necesario realizar un proceso iterativo, utilizando las siguientes ecuaciones.

RESUMEN ECUACIONES UTILIZADAS PARA EL CÁLCULO DE DM			
Parámetro	Simbología	Ecuación	Referencia
Desplazamiento máximo asumido para inicio de iteraciones	D_M	$D_M = \frac{S_{DS} * g}{(\frac{2\pi}{T})^2}$	ASCE 7- 22 / Reporte FTP
Desplazamiento máximo calculado	D_M	$D_M = \frac{gS_{M1}T_M}{4\pi^2 B_M}$	ASCE 7-22 EC.17.5-1
Rigidez efectiva	K_M	$k_M = \frac{\sum FM^+ + \sum FM^-}{2D_M}$ $k_M = k_d + \frac{Q_d}{D_M}$	ASCE 7-22 EC.17.2-3 Reporte FTP
Rigidez Post-Elástica	K_d	$K_d = \frac{W}{2R_{1eff}}$	Curva de histéresis Fase III

Periodo efectivo	T_M	$T_M = 2\pi \sqrt{\frac{W}{k_M g}}$	ASCE 7-22 EC.17.5-2
Amortiguamiento efectivo	β_M	$\beta_M = \frac{\Sigma E_M}{2\pi k_M D_M^2}$ $\beta_M = \frac{2Q_d(D_M - Y)}{\pi k_M D_M^2}$	ASCE 7-22 EC.17.5-4
Desplazamiento en fluencia	Y	$Y = (\mu_1 - \mu_2)R_{2eff}$	Curva de histéresis Fase III
Desplazamiento total máximo	D_{TM}	$1.15D_M$	Sección 17.5.3.3

Tabla 5. Ecuaciones desplazamiento máximo – Método ELF

Donde:

g: aceleración de la gravedad

S_{M1} : Aceleración espectral periodos largos 1s

Q_d : Resistencia característica

ΣE_M : Energía total disipada del sistema de aislación

En la tabla 5, se encuentra el amortiguamiento efectivo β_M , el mismo que permite conocer el factor de amortiguamiento (B_M) en función de la tabla 17.5-1, correspondiente al capítulo 17 de la norma ASCE 7-22. El valor del Factor de amortiguamiento debe ser interpolado.

Table 17.5-1. Damping Factor, B_M .

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

^a The damping factor shall be based on the effective damping of the isolation system, determined in accordance with the requirements of Section 17.2.8.6.

^b The damping factor shall be based on linear interpolation for effective damping values other than those given.

Tabla 6. Factor de Amortiguamiento B_M Fuente: ASCE 7-16

El cálculo del desplazamiento total máximo, no se calcula con la EC 17.5.1 de la ASCE 7-22, pues, los sistemas de aislación que usan aisladores de fricción de triple péndulo, tienen la capacidad de minimizar los movimientos torsionales, por lo tanto, se asume que el desplazamiento máximo, es igual al desplazamiento máximo total, sin embargo, en la ASCE 7-22, se estipula que el desplazamiento total máximo no puede ser menor al 15% del desplazamiento máximo.

- **Fuerzas laterales mínimas requeridas para el diseño**

Para el cálculo de las fuerzas laterales mínimas se utiliza las ecuaciones expuestas en la ASCE 7-22, tanto para elementos estructurales que se encuentran bajo el nivel de la base aislada, así como también, para elementos que están sobre la base aislada. Todas ecuaciones se encuentran en la tabla 7.

Elementos estructurales bajo nivel de base		
Simbología	Ecuación	Referencia
V_b	$V_b = K_M D_M$	ASCE 7-22 EC.17.5-5
Elementos estructurales sobre el nivel de base		
Simbología	Ecuación	Referencia
V_s	$V_s = \frac{V_{st}}{R_1}$	ASCE 7-22 EC.17.5-6
V_{st}	$V_{st} = V_b \left(\frac{W_s}{W}\right)^{1-2.5\beta_M}$	ASCE 7-22 EC.17.5-7

Tabla 7. Ecuaciones Fuerzas Laterales Mínimas.

Donde:

W: Peso sísmico efectivo de la estructura sobre la interface del aislamiento

W_s : Peso sísmico efectivo de la estructura sobre la interfase de aislamiento sin considerar el nivel de base

V_{st} : Fuerza lateral sísmica sin reducir para los elementos sobre el nivel de base

R_1 : Coeficiente numérico relacionado al tipo de sistema estructural sobre el nivel de base.

El valor del coeficiente R_1 , es igual a $3/8R$, siendo R , el factor de reducción sísmica para edificios con base fija, este valor no debe ser mayor a 2 ni menor a 1.

- **Límites de V_s , según ASCE 7-22**

- ✓ La fuerza V_s , fuerza lateral de una estructura empotrada, con una carga sísmica W_s y un periodo asociado al periodo aislador T_M , de acuerdo al apartado 12.8 de la ASCE 7-2, no puede ser menor a los siguientes límites:

$$V = C_s W \quad \text{EC 12.8-1}$$

$$C_s = \frac{S_{D1}}{\left(\frac{R}{I_e}\right)} \quad \text{EC 12.8-3}$$

Condicionantes C_s		
Cs no debe exceder a:		
Condición	Ecuación	Referencia
$T \leq T_L$	$C_s = \frac{S_{D1}}{T \left(\frac{R}{I_e}\right)}$	ASCE 7-22 EC.12.8-4
$T > T_L$	$C_s = \frac{S_{D1} T_L}{T^2 \left(\frac{R}{I_e}\right)}$	ASCE 7-22 EC.12.8-5
Cs, no debe ser menor a:		
Condición	Ecuación	Referencia
$C_s > 0.01$	$C_s = 0.044 S_{D1} I_e$	ASCE 7-22 EC.12.8-6
Donde $S_1 \geq 0.6g$	$C_s = \frac{0.5 S_1}{\left(\frac{R}{I_e}\right)}$	ASCE 7-22 EC.12.8-7

Tabla 8. Límites V_s según ASCE 7-22

- ✓ La fuerza V_s , no puede ser menor al cortante generado en la base por la carga de viento de diseño factorizada.
- ✓ La fuerza V_s , no puede ser menor a la fuerza sísmica lateral V_{st} , calculada con V_b igual a la fuerza requerida para activar el sistema de aislación, usando las propiedades más altas de Upper Bound.
 - a) 1.5 veces las propiedades nominales para el nivel de fluencia de un sistema de ablandamiento.
 - b) La capacidad máxima de un sistema sacrificial de contención del viento.
 - c) Fuerza de fricción de rotura en un sistema deslizante.
 - d) La fuerza de desplazamiento cero de un sistema deslizante después de un ciclo dinámico completo de movimiento en D_M .

Table 1.5-2. Importance Factors by Risk Category of Buildings and Other Structures for Earthquake Loads.

Risk Category from Table 1.5-1	Seismic Importance Factor, I_e
I	1.00
II	1.00
III	1.25
IV	1.50

Notes: The component importance factor, I_p , applicable to earthquake loads is not included in this table because it depends on the importance of the individual component rather than that of the building as a whole, or its occupancy (see Section 13.1.3).

Tabla 9. Factor sísmico de importancia Fuente: ASCE 7-22

3.3.2. Método según Análisis Sísmico Moderno, Salvador Ismael Gómez Chávez

Se plantea el análisis de un edificio de múltiples pisos con el siguiente procedimiento:

Para referirse a las propiedades de base fija se utiliza la simbología f, y para referirse a las propiedades de base aislada se utiliza la simbología b.

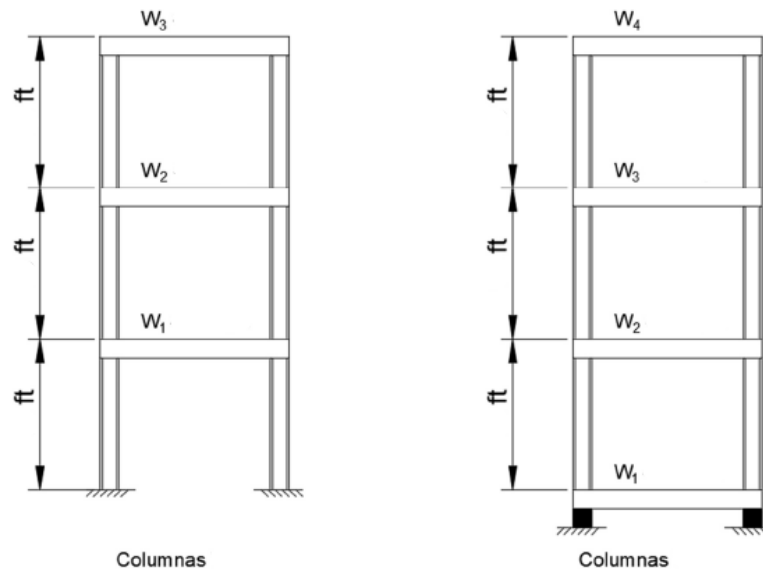


Figura 22. Representación 2D de edificio con base fija y base aislada

Representación de una estructura con pórticos equivalentes, se indica a la izquierda un pórtico con base fija, empotrado a la cimentación, mientras que, a la derecha, el pórtico cuenta con una cimentación aislada de la base. (Ver figura 22)

- ✓ Propiedades para estructura con base fija

$$\omega_f = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad T_f = \frac{2\pi}{\omega_f} \quad \zeta_f = \frac{c}{2m\omega_f}$$

- ✓ Propiedades para estructura con base aislada.

$$T_b = \frac{2\pi}{\omega_b} \quad \omega_b = \sqrt{\frac{k_b}{m + m_b}} \quad \zeta_b = \frac{c_b}{2(m + m_b)\omega_b}$$

- ✓ Definición de matrices de masa y rigidez de la estructura.

$$M := \begin{bmatrix} \frac{Wb}{g} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{W1}{g} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{W2}{g} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{W3}{g} \end{bmatrix}$$

Matriz de Masa

$$K := \begin{bmatrix} Kb + 2 K1 & -2 K1 & 0 & 0 \\ -2 K1 & 2 K1 + 2 K2 & -2 K2 & 0 \\ 0 & -2 K2 & 2 K2 + 2 K3 & -2 K3 \\ 0 & 0 & -2 K3 & 2 K3 \end{bmatrix}$$

Matriz de Rigidez con Base Aislada

$$KC := \begin{bmatrix} 2 K1 & -2 K1 & 0 & 0 \\ -2 K1 & 2 K1 + 2 K2 & -2 K2 & 0 \\ 0 & -2 K2 & 2 K2 + 2 K3 & -2 K3 \\ 0 & 0 & -2 K3 & 2 K3 \end{bmatrix}$$

Matriz de Rigidez con Base Fija

Una vez, definidas las matrices de masa y rigidez se procede a resolver el problema de valores y vectores propios con la ayuda del software Mathcad, obteniendo los modos de vibración de la estructura.

$$w_{cuadrado} := \text{genvals}(K, M):$$

$$A := K^{-1} \cdot M$$

$$w := \left(\frac{1}{\text{eigenvals}(A)} \right)^{0.5}$$

- ✓ La matriz de amortiguamiento de la estructura de la basa aislada, se obtiene de la siguiente forma.

- a) La estructura fija tiene una matriz de amortiguamiento igual a:

$$C_f = a_1 k_f$$

Donde, a_1 , se calcula para un 5% de amortiguamiento en el modo fundamental.

Según (Chopra, 2012), $a_1 = \zeta_f * \frac{2}{\omega_o}$.

$$c := a_1 \cdot KC$$

- b) A esta matriz se le añade el termino cb , que corresponde al valor de amortiguamiento del sistema de aislamiento, el cual posee una relación de amortiguamiento ζ_b .

Para obtener el valor de cb , es necesario el uso de las siguientes expresiones: (Ver Procedimiento en el Anexo 1)

$$wb := \sqrt{\frac{Kb}{\left(\frac{W1}{g} + \frac{W2}{g} + \frac{W3}{g}\right) + \frac{Wb}{g}}}$$

$$Tb := 2 \cdot \frac{\pi}{wb}$$

$$cb := \zeta_b \cdot 2 \cdot \left(\frac{W1}{g} + \frac{W2}{g} + \frac{W3}{g} + \frac{Wb}{g}\right) \cdot wb$$

$$cb_m := \begin{bmatrix} cb & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$c_aisl := c + cb_m$$

- ✓ Con el cálculo de los vectores propios de la matriz $A = K^{-1}M$ con la ayuda del software Mathcad, se tiene como resultado la matriz ϕ .

$$\phi := \text{eigenvecs}(A)$$

Se procede a calcular la expansión modal, dividiendo los valores de cada fila de la matriz ϕ , para el primer valor de cada fila. Se repite el procedimiento para todas las filas de la matriz ϕ . El resultado de estas operaciones es la obtención de la matriz de expansión modal Φ . (Ver Anexo 1).

$$\Phi := \begin{bmatrix} \phi n1_0 & \phi n2_0 & \phi n3_0 & \phi n4_0 \\ \phi n1_1 & \phi n2_1 & \phi n3_1 & \phi n4_1 \\ \phi n1_2 & \phi n2_2 & \phi n3_2 & \phi n4_2 \\ \phi n1_3 & \phi n2_3 & \phi n3_3 & \phi n4_3 \end{bmatrix}$$

- A partir de la matriz de masa modal, se obtiene los factores de contribución modal, los cuales son necesarios para el cálculo de las fuerzas de expansión modal. (Ver Anexo 1).

$$M_{\text{modal}} := \Phi^T \cdot M \cdot \Phi$$

$$M_{\text{modal}} = \begin{bmatrix} M_{\text{modal}1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M_{\text{modal}2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & M_{\text{modal}3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & M_{\text{modal}4} \end{bmatrix}$$

$$s := M \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$Tn(i) = \frac{\phi n1^T \cdot s}{M_{\text{modal}(i)}}$$

$$Sn(i) = Tn(i) \cdot M \cdot \phi n(i)$$

- Las fuerzas de expansión modal, permiten el cálculo de las pre cortantes basales. Es importante tener en cuenta, que el resultado de las pre cortantes

basales es igual a la suma de todas las componentes de la matriz $S_n(i) = T_n(i) \cdot M \cdot \Phi_n(i)$, sin tomar en cuenta el valor correspondiente a la base aislada. (Ver Anexo 1).

$$V_b(i) = S_{n1}(i) + S_{n2}(i) + S_{n3}(i)$$

- Los desplazamientos estáticos en la base del sistema se obtienen de la multiplicación de: (Ver Anexo 1).

$$w_{Ub1} := \begin{bmatrix} T_{n1} \cdot \phi_{n1} \\ T_{n2} \cdot \phi_{n2} \\ T_{n3} \cdot \phi_{n3} \\ T_{n4} \cdot \phi_{n4} \end{bmatrix}$$

- La relación de amortiguamiento viene dada por: (Ver Anexo 1).

$$C := \Phi^T \cdot c_{\text{aisl}} \cdot \Phi$$

$$\zeta_b = \frac{c_b}{2(m + m_b)\omega_b}$$

- Conociendo la relación Sa/g de cada periodo y amortiguamiento obtenido en el paso anterior, se puede obtener el cortante basal de la estructura: (Ver Anexo 1).

$$V_{bf}(i) = \frac{S_a}{g}(i) \cdot V_b(i) \cdot g$$

$$V_{bf} = \sqrt{V_{f1}^2 + V_{f2}^2 + \dots + V_{fn}^2}$$

- La deformación máxima viene dada por la expresión: (Ver Anexo 1).

$$D(i) = \frac{S_a}{\left(\frac{2 \cdot \pi}{T(i)}\right)^2}$$

$$Ub(i) = \omega Ub1_i . D(i)$$

$$Ubn = \sqrt{Ub1^2 + Ub2^2 + \dots + Ubn^2}$$

- Para conocer si el uso de los aisladores sísmicos en la estructura trae consigo beneficios, la relación de cortante basal de la base aislada con el cortante basal de la base fija debe ser menor a 1. (Ver Anexo 1).

3.3.3. Método Modelo Tri-lineal

A pesar, de que el presente trabajo se desarrolla en función de los métodos explicados en los apartados 3.3.1. y 3.3.2, es importante conocer de qué trata el método propuesto por el Dr. Roberto Aguiar, el mismo, que se encuentra expuesto en el documento ANÁLISIS NO LINEAL DEL AISLADOR DE TRIPLE PÉNDULO DE FRICCIÓN MEDIANTE EL MODELO TRI-LINEAL (Pablo Leiva, Roberto Aguiar, 2017).

El modelo Tri-Lineal, consiste en la idealización del comportamiento de los aisladores de triple péndulo, el cual es no lineal y complejo.

A diferencia de lo planteado por (Fenz D. , Constantinou M., 2008), que plantean 5 fases de movimiento utilizando 12 parámetros geométricos y 4 coeficientes de rozamiento, en (Fadi, D., y Constantinou, M., 2010) se reduce el número de fases de movimiento al utilizar tan solo 6 parámetros geométricos y 2 coeficientes de rozamiento.

Con el fin de determinar el desempeño que tienen los aisladores de triple péndulo, se plantea el análisis no lineal de un grado utilizando el concepto del modelo tri-lineal planteado por (Fadi, D., y Constantinou, M., 2010).

En el modelo tri-lineal, para obtener el punto de fluencia se usa las ecuaciones de la fuerza y el desplazamiento en el régimen I, y el punto final se obtiene con el uso de las ecuaciones del régimen III.

El método propuesto por el Dr. Aguiar es un procedimiento computacional para realizar un análisis no lineal de los aisladores sísmicos y parte del uso del método de β de Newmark, el cual se encuentra explica (Ing. Diego Quizanga, Ing. José Almazán, 2021) (PhD, 2021) (PhD I. A., 2021)do en (Aguiar, 2012).

Para aplicar el procedimiento de cálculo, se parte del supuesto que el aislador está en el régimen de movimiento I, en el cual $t=0$ y las condiciones iniciales son nulas.

Paso 1: Datos del aislador y acelerograma.

- Geometría del aislador
- Coeficientes de fricción propios del aislador
- m = Masa del aislador + Masa actuante sobre el aislador

- $W =$ Peso total
- $g =$ Acelerograma
- $p = g * m$

Paso 2: Definición del caso en el que se va a utilizar

- Método de la aceleración constante, $\gamma = 1/2$ y $\beta = 1/4$.
- Método de la aceleración lineal, $\gamma = 1/2$ y $\beta = 1/6$.
- Método de la aceleración escalonada, $\gamma = 1/2$ y $\beta = 1/8$.

Paso 3: Definición de condiciones iniciales

- $q_0 = 0 \text{ m}$ (desplazamiento)
- $\dot{q}_0 = 0 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ (velocidad)
- $\ddot{q}_0 = 0 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ (aceleración)

Los cálculos de desplazamiento, velocidad y aceleración, se realizan para cada iteración, q_i , \dot{q}_i , \ddot{q}_i .

Paso 4: Intervalo de tiempo Δt :

- $\Delta t = t_{i+1} - t_i$

Paso 5: Cálculo de amortiguamiento

Los valores de k_i , depende del régimen de movimiento donde se encuentra el análisis.

- $c = 2 * \xi * \sqrt{m * k_i}$

Donde:

$k_i =$ rigidez elástica o plástica

$\xi =$ factor de amortiguamiento

$c =$ amortiguamiento para un sistema de un grado de libertad

Paso 6: Rigidez equivalente e intervalo de carga:

- $a = \frac{1}{\beta * \Delta t} * m + \frac{\gamma}{\beta} * c$
- $b = \frac{1}{2 * \beta} * m + \Delta t * \left(\frac{\gamma}{2 * \beta} - 1 \right) * c$
- $\hat{k}_i = k_i + \frac{\gamma}{\beta * \Delta t} * c + \frac{1}{\beta * \Delta t^2} * m$
- $\Delta \hat{p}_i = \Delta p_i + a \dot{q}_i + b \ddot{q}_i$

Donde:

\widehat{k}_l = rigidez equivalente

$\Delta\widehat{p}_l$ = intervalo de carga

Paso 7: Intervalo desplazamiento y velocidad

- $\Delta q_i = \frac{\Delta\widehat{p}_l}{\widehat{k}_l}$
- $\Delta q_i = \frac{\gamma}{\beta*\Delta t} \Delta q_i - \frac{\gamma}{\beta} \dot{q}_i + \Delta t * (1 - \frac{\gamma}{2\beta}) \ddot{q}_i$

Paso 8: Respuesta de desplazamiento, velocidad, fuerza lateral y aceleración del aislador para un tiempo t.

- $q_{i+1} = \Delta q_i + q_i$
- $q_{i+1} = \Delta q + \dot{q}_i$

Paso 9: Aceleración – Ecuación diferencial de movimiento

- $\ddot{q}_{i+1} = \frac{p_{i+1} - c*\dot{q}_{i+1} - (fs)_{i+1}}{m}$

Donde:

$$(fs)_{i+1} = (fs)_i + k_i \Delta q_i$$

(fs) = Fuerza lateral asociada a la rigidez, varía en función al régimen en el q se encuentra el modelo.

Factor de amortiguamiento:

El aislador, en la fase I de movimiento tiene la característica de tener una rigidez alta y un amortiguamiento bajo, por lo tanto, el factor de amortiguamiento $\xi = 0.05$.

Al pasar a la fase II, el amortiguamiento se calcula para cada instante con la ecuación:

$$\xi = \frac{E_D}{4\pi E_S}$$

En la figura que se encuentra a continuación, se determina 4 áreas iguales que son divididas por las abscisas y ordenadas, las mismas que resultan del producto de $F*DD$, y que, para encontrar la Energía Disipada por cada ciclo se deberá restar las áreas A1, A2 y A3.

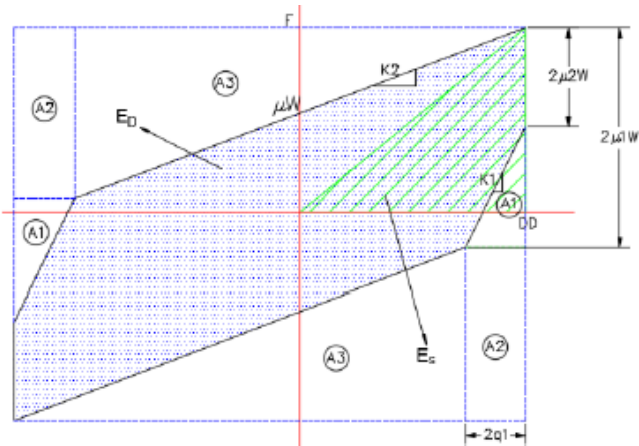


Figura 23. Cálculo de Energía Disipada y Energía Elástica (Pablo Leiva, Roberto Aguiar, 2017)

Grafica del resultado de multiplicar la fuerza por el desplazamiento, para un tiempo t variable, la gráfica es simétrica. La energía disipada se obtiene al restar las áreas A1, A2 y A3. (Ver figura 23)

Por lo tanto, la ecuación que define la energía disipada es:

$$E_D = 4(F * DD) - 2A_1 - 2A_2 - 2A_3$$

Simplificando,

$$E_D = 4 * (q_1 * \mu_2 * W - q_1 * F + DD * 2 * \mu_1 * W)$$

Pasos para el cálculo del amortiguamiento del aislador:

Paso 1: Cálculo de DD, para un tiempo igual t .

Paso 2: Cálculo de Fuerza F

$$F = K_2 * DD + \mu * W$$

Paso 3: Energía Disipada.

$$E_D = 4 * (q_1 * \mu_2 * W - q_1 * F + DD * 2 * \mu_1 * W)$$

Paso 4: Energía Elástica

$$E_s = \frac{F * DD}{2}$$

Paso 5: Zeda para tiempo t.

$$\xi = \frac{E_D}{4\pi E_s}$$

3.3.4. Método Simplificado a dos grados de libertad.

De acuerdo a lo expuesto en (Tornello, 2012), el sistema de aislamiento más sencillo es aquel donde la masa “m”, que representa la masa de la estructura fija, esta soportada sobre un dispositivo de baja rigidez a los desplazamientos horizontales.

Este dispositivo tiene como función el aislar a la estructura de una excitación externa (desplazamiento del suelo producido por la acción del sismo).

Para la aplicación del método simplificado de dos grados de libertad, se analiza una estructura con los siguientes datos de partida.

Se tiene un edificio con una masa concentrada “m”, una rigidez “k” y su coeficiente de amortiguamiento “c”.

- **Datos de partida:**

Datos base fija	
W	40 kip
g	386 in/s ²
m	0.1 kip s ² /in
k	25 kip/in
ζ_f	0.02
Datos base aislada	
mb= 2/3 m	0.067 kip s ² /in
kb	2 kip/in
ζ_b	0.10

- **Propiedades base fija y base aislada.**

$$\omega_f = \sqrt{\frac{k}{m}} = \sqrt{\frac{25}{0.1}} = 15.81 \frac{rad}{s}$$

$$T_f = \frac{2\pi}{\omega_f} = \frac{2\pi}{15.81} = 0.397 \cong 0.4 s.$$

$$c = 2 * m * \omega_f * \zeta_f = 2 * 0.1 * 15.81 * 0.02 = 0.06 \frac{kip * s}{in}$$

Frecuencia angular asumiendo que la estructura tiene un sistema de aislación:

$$\omega_b = \sqrt{\frac{k_b}{m + m_b}} = \sqrt{\frac{2}{0.067 + 0.1}} = 3.46 \frac{rad}{s}$$

Periodo de vibración asumiendo que la estructura tiene un sistema de aislación:

$$T_b = \frac{2\pi}{\omega_b} = \frac{2\pi}{3.46} = 1.81 s$$

Coefficiente de amortiguamiento asumiendo que la estructura tiene un sistema de aislación:

$$c_b = 2 * (m + m_b) * \omega_b * \zeta_b = 2 * 0.167 * 3.46 * 0.1 = 0.11 \frac{kip * s}{in}$$

- **Propiedades de vibración.**

Se definen las matrices de masa, rigidez y amortiguamiento:

$$k = \begin{bmatrix} k_b + k & -k \\ -k & k \end{bmatrix}, k = \begin{bmatrix} 27 & -25 \\ -25 & 25 \end{bmatrix}$$

$$m = \begin{bmatrix} m_b & 0 \\ 0 & m \end{bmatrix}, m = \begin{bmatrix} 0.067 & 0 \\ 0 & 0.1 \end{bmatrix}$$

$$c = \begin{bmatrix} c_b + c & -c \\ -c & c \end{bmatrix}, c = \begin{bmatrix} 0.17 & -0.06 \\ -0.06 & 0.06 \end{bmatrix}$$

Con la ayuda del software Mathcad, se calcula los valores y vectores propios y se obtienen los modos de vibración.

$$\omega_{\text{cuadrado}} = \text{genvals}(k, m) \begin{bmatrix} 641.35 \\ 11.64 \end{bmatrix}$$

$$Aux = k^{-1} * m = \begin{bmatrix} 0.034 & 0.05 \\ 0.034 & 0.054 \end{bmatrix}$$

$$\omega = \left(\frac{1}{\text{eigenvals}(Aux)} \right)^{0.5} = \begin{bmatrix} 3.411 \\ 25.325 \end{bmatrix}$$

$$T = \begin{bmatrix} 2 * \frac{\pi}{\omega_0} \\ 2 * \frac{\pi}{\omega_1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.842 \\ 0.248 \end{bmatrix}$$

El periodo calculado, comparado con el de las matrices es de 0.03, 1,84 s, es similar al 1.81s calculado.

$$\phi = \text{eigenvecs}(A) = \begin{bmatrix} -0.69 & -0.843 \\ -0.724 & 0.538 \end{bmatrix}$$

Matriz de modos de vibración y de distribución especial de fuerzas sísmicas:

$$\phi_1 = \frac{\phi_0^0}{\phi_{0,0}} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1.049 \end{bmatrix}$$

$$\phi_2 = \frac{\phi_0^0}{\phi_{0,1}} = \begin{bmatrix} 1 \\ -0.639 \end{bmatrix}$$

$$s = m_1 = \begin{bmatrix} 0.067 & 0 \\ 0 & 0.1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.067 \\ 0.1 \end{bmatrix}$$

$$\Phi = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1.049 & -0.639 \end{bmatrix}$$

Matriz de masa modal:

$$M = \Phi^T m \Phi = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1.049 & -0.639 \end{bmatrix}^T * \begin{bmatrix} 0.067 & 0 \\ 0 & 0.1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1.049 & -0.639 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.177 & 0 \\ 0 & 0.108 \end{bmatrix}$$

$$M_1 = 0.177$$

$$M_1 = 0.108$$

Factor de contribución para cada modo de vibración:

$$T_1 = \frac{\phi_1^T * s}{M_{0,0}} = 0.971$$

$$T_2 = \frac{\phi_2^T * s}{M_{1,1}} = 0.029$$

Contribución de cada modo de vibración a "s" para calcular el cortante que llega a la base de la estructura, no es necesario calcular la base del sistema de aislamiento.

$$s = T_n * m * \phi_n$$

$$s = 0.971 * \begin{bmatrix} 0.067 & 0 \\ 0 & 0.1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1.0 \\ 1.049 \end{bmatrix} * 0.1 = \begin{bmatrix} 0.67 \\ 1.015 \end{bmatrix}$$

$$s = 0.0242 * \begin{bmatrix} 0.067 & 0 \\ 0 & 0.1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1.0 \\ -0.640 \end{bmatrix} * 0.1 = \begin{bmatrix} 0.016 \\ -0.015 \end{bmatrix}$$

$$V_{b1}^{st} = 1.015 \text{ m}$$

$$V_{b2}^{st} = -0.015 \text{ m}$$

Matriz de amortiguamiento:

$$c = \Phi^T c_c \Phi = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1.049 & -0.639 \end{bmatrix}^T * \begin{bmatrix} 0.17 & -0.06 \\ -0.06 & 0.06 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1.049 & -0.639 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.104 & 0.10 \\ 0.10 & 0.27 \end{bmatrix}$$

$$\zeta_1 = \frac{c_1}{2 * M_1 * \omega_1} = \frac{0.104}{2 * 0.175 * \frac{2\pi}{1.84}} = 0.087$$

$$\zeta_2 = \frac{c_2}{2 * M_2 * \omega_2} = \frac{0.27}{2 * 0.108 * \frac{2\pi}{0.248}} = 0.0438$$

Con este resultado, se observa que el amortiguamiento modal de la estructura en su primer modo es casi igual al amortiguamiento que se obtiene en el sistema de aislamiento.

El amortiguamiento del sistema de aislamiento del 10% ha incrementado el amortiguamiento modal del modo estructural pasando de 2% inicial, al 4.38%.

CAPÍTULO 4

4. CASO DE ESTUDIO

4.1. Introducción

Se presenta a continuación la recreación y análisis estructural del edificio del bloque A del Centro de Investigación de salud de América Latina de la PUCE, construido de manera tradicional versus el mismo bloque con aisladores sísmicos en las columnas que lo conforman.

Debido al desnivel existente en la estructura, se optó por colocar a los aisladores en la primera planta, colocando una viga de amarre entre las columnas.

La versión tradicional está diseñada bajo los parámetros de la Norma Ecuatoriana de la Construcción 2015, mientras que la versión modificada con aisladores sísmicos está diseñada contemplado lo sugerido en la Norma Americana ASCE 7-22.

4.2. Información del proyecto

El presente trabajo presenta el análisis de un bloque del CENTRO DE INVESTIGACIÓN DE SALUD DE AMÉRICA LATINA DE LA PUCE, el mismo que fue modelado en el software Etabs. Es importante mencionar que se obtuvo información estructural del mismo, sin embargo, no se dispone de planos As built, ni de detalle, por lo que la recreación del mismo es similar.

El bloque A del centro de investigación de salud de América Latina de la Puce, está compuesto por 12 pórticos en el eje X y 7 pórticos en el eje Y.

La configuración estructural es de acero ASTM A-36, con losas deck.

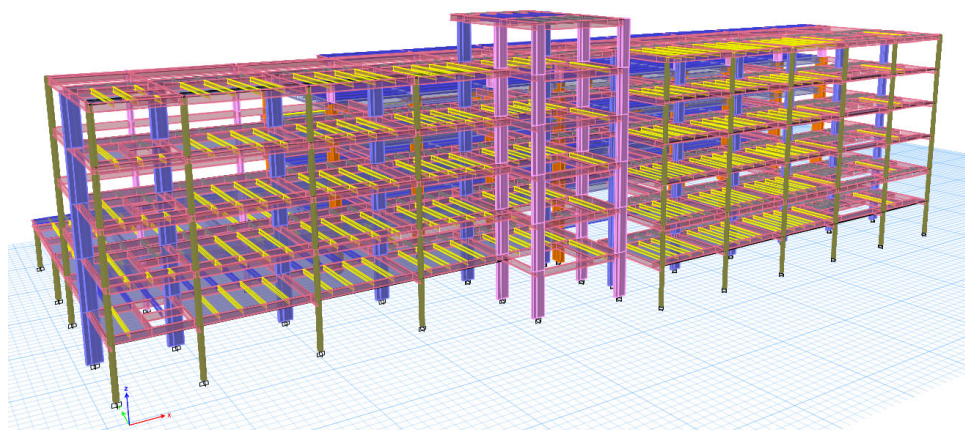


Figura 24. Modelo 3D del Bloque A del Centro de Investigación de Salud de América Latina de la PUCE.

*Representación de la estructura del bloque A del centro de investigación de salud de América Latina de la Puce, en el modelo 3D elaborado en el software Etabs.
(Ver figura 24)*

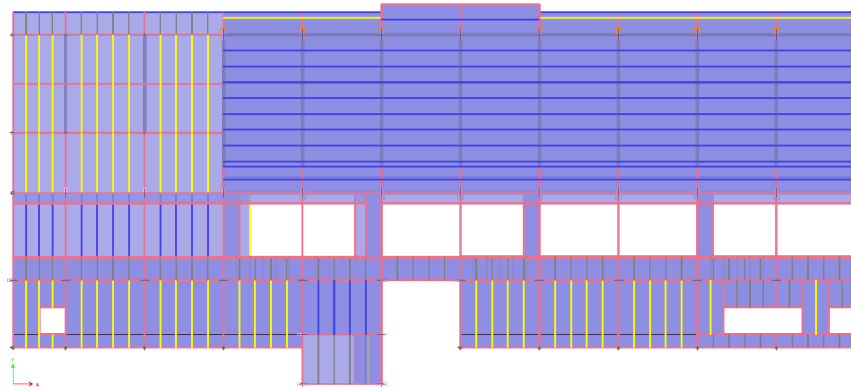


Figura 25. Planta del Bloque A del Centro de Investigación de Salud de América Latina de la PUCE.

Vista en planta del centro de investigación de salud de América Latina de la Puce, modelado en el software Etabs. (Ver figura 25)

4.2.1. Cargas del Edificio

Las cargas gravitacionales que se aplican en el edificio son las siguientes.

Carga Muerta

La carga muerta adicional que se coloca en el edificio corresponde a la carga de mobiliario y mampostería y equivale a 150 kg/m^2 .

Carga Viva

La carga viva que se aplica como carga gravitacional es la indicada en la norma ecuatoriana de la construcción NEC 15, en función de la utilidad que tendrá el edificio, la misma que corresponde a un centro de educación e investigación, por lo tanto, la carga aplicada corresponde a 250 kg/m^2 .

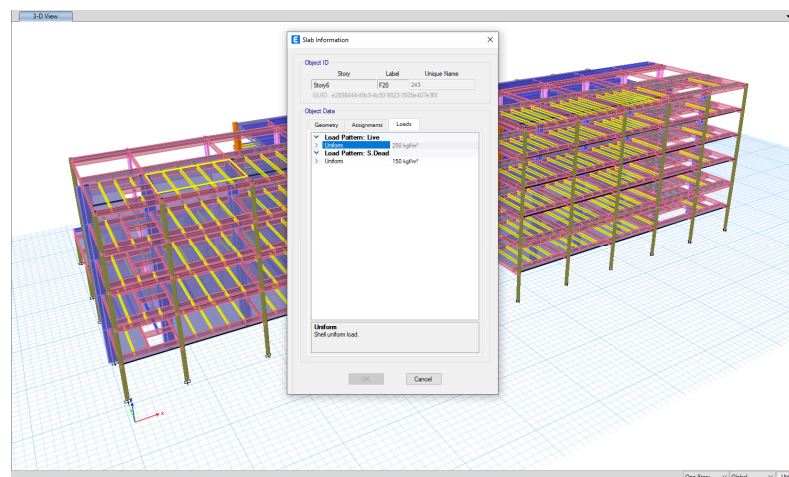


Figura 26. Cargas gravitacionales aplicadas en el edificio de estudio

Ingreso de cargas gravitacionales, Viva y muerta en el modelo del Centro se de investigación de salud de América Latina de la Puce, en el software Etabs. (Ver figura 26)

TABLE: Base Reactions			
Output Case	Case Type	FZ	FZ
		kgf	Ton
Dead	LinStatic	3145225.71	3145.23
Live	LinStatic	2084816.69	2084.82
S.Dead	LinStatic	1250890.01	1250.89
Total Carga Muerta		4396115.72	4396.12
Total Carga Viva		2084816.69	2084.82

Tabla 10. Resumen cargas gravitacionales

4.2.2. Peligro Sísmico

El análisis de peligro sísmico para el edificio con cimentación tradicional, se lo realizó en función de los parámetros establecidos en la norma ecuatoriana de la construcción, NEC 2015.

Parámetros:

- Determinar la Zona sísmica, en función del lugar donde se encuentra ubicada la estructura analizada, en el caso de estudio, la edificación, está en la ciudad de Quito, en el Sector de Nayón.

Valores del Factor Z en función de la Zona Sísmica, Tabla 1, tomada de la NEC-SE-DS, pág. 27 NEC-2015

Zona sísmica	I	II	III	IV	V	VI
Z	0.15	0.25	0.30	0.35	0.40	≥0,50

Tabla 11. Zona Sísmica, NEC 2015

- Factores de Sitio y comportamiento Inelástico del Sub-suelo, en función del tipo de suelo. Al no conocer el tipo de suelo del lugar donde se encuentra la estructura analizada, se asume un suelo de baja capacidad portante, Suelo tipo "D".

Tipo de Suelo y Factores de Sitio Fa, Tabla 3, tomada de la NEC-SE-DS, pág. 31 NEC-2015

Valor Z	I	II	III	IV	V	VI
Tipo de perfil del subsuelo	0.15	0.25	0.30	0.35	0.4	≥ 0,5
A	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
B	1	1	1	1	1	1
C	1.4	1.3	1.25	1.23	1.2	1.18
D	1.6	1.4	1.3	1.25	1.2	1.12
E	1.8	1.4	1.25	1.1	1	0.85
F	Véase Tabla 2 NEC-SE-DS					

Tabla 12. Fa, Coeficiente de amplificación de suelo en la zona de período corto, NEC 2015

Tipos de Suelo y Factores de Sitio Fd, Tabla 4, tomada de la NEC-SE-DS, pág. 31 NEC-2015

Valor Z	I	II	III	IV	V	VI
Tipo de perfil del subsuelo	0.15	0.25	0.30	0.35	0.4	≥ 0,5
A	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
B	1	1	1	1	1	1
C	1.36	1.28	1.19	1.15	1.11	1.06
D	1.62	1.45	1.36	1.28	1.19	1.11
E	2.1	1.75	1.7	1.65	1.6	1.5
F	Véase Tabla 2 NEC-SE-DS					

Tabla 13. Fd, amplificación de las ordenadas del espectro elástico de respuesta de desplazamiento para diseño en roca, NEC 2015

Tipos de Suelo y Factores del Comportamiento Inelástico del Sub-suelo Fs, Tabla 5, tomada de la NEC-SE-DS, pág. 32 NEC-2015

valor Z	I	II	III	IV	V	VI
Tipo de perfil del subsuelo	0.15	0.25	0.30	0.35	0.4	≥ 0,5
A	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
B	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
C	0.85	0.94	1.02	1.06	1.11	1.23
D	1.02	1.06	1.11	1.19	1.28	1.4
E	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2
F	Véase Tabla 2 NEC-SE-DS					

Tabla 14. Fs, Factor de comportamiento no lineal de los suelos, NEC 2015

- Definición del Espectro Elástico de diseño en aceleraciones, NEC 2015.

Espectro Elástico de diseño en aceleraciones tomado de la NEC-SE-DS, pág 32 NEC-2015

$$S_a = \eta \times Z \times F_a \times \left(\frac{T_c}{T}\right)^r, \text{ para } T > T_c$$

$$S_a = \eta \times Z \times F_a, \quad \text{para } 0 \leq T \leq T_c$$

$$\eta = 2.48 \quad \text{Provincias del sierra}$$

$$r = 1.00 \quad \text{Para tipo de suelo D}$$

$$S_a = 0.98$$

Donde se conoce que $\eta = 2.48$, al estar ubicado en la zona sierra el Ecuador.

- Se determinar la importancia de la estructura en función del tipo y utilidad que tiene la misma.

CATEGORIA	TIPO DE USO, DESTINO E IMPORTANCIA	COEFICIENTE I
Edificaciones esenciales	Hospitales, clínicas, Centros de salud o de emergencia sanitaria. Instalaciones militares, de policía, bomberos, defensa civil. Garajes o estacionamientos para vehículos y aviones que atienden emergencias. Torres de control aéreo. Estructuras de centros de telecomunicaciones u otros centros de atención de emergencias. Estructuras que albergan equipos de generación y distribución eléctrica. Tanques u otras estructuras utilizadas para depósito de agua u otras sustancias anti-incendio. Estructuras que albergan depósitos tóxicos, explosivos, químicos u otras sustancias peligrosas.	1.5
Estructuras de ocupación especial	Museos, iglesias, escuelas y centros de educación o deportivos que albergan más de trescientas personas. Todas las estructuras que albergan más de cinco mil personas. Edificios públicos que requieren operar continuamente	1.3
Otras estructuras	Todas las estructuras de edificación y otras que no clasifican dentro de las categorías anteriores	1

Tabla 15. Coeficiente I, NEC 2015

- El factor de reducción sísmica, y los coeficientes de irregularidad en planta y elevación están en función de la geometría de la estructura y sus características constructivas.

Coefficientes de configuración en planta \emptyset_P y elevación \emptyset_E , Tabla 13 y Tabla 14 tomado de la NEC-SE-DS, págs. 50-52

$$\emptyset_P = 0.9 \quad \text{Estructura irregular en planta}$$

$$\emptyset_E = 0.9 \quad \text{Estructura irregular en elevación}$$

Coefficiente de reducción de respuesta estructural, Tabla 15, tomada de la NEC-SE-DS, pág. 65 NEC-2015

$$R = 5 \quad \text{Otros sistemas estructurales para edificaciones}$$

- Cálculo del coeficiente del cortante basal, valor que se ingresa dentro del software Etabs, para simular las condiciones sísmicas.

Cortante Basal, tomado de la NEC-SE-DS, pág. 61 NEC 2015

$$V = \frac{I \times S_a}{R \times \phi_p \times \phi_E} W$$

$$V = 0.21280 W \quad \text{Base Shear Coefficient } C, \text{ en Etabs}$$

The screenshot shows the 'Seismic Load Pattern - User Defined' dialog box. It is divided into three main sections: 'Direction and Eccentricity', 'Factors', and 'Story Range'. In the 'Direction and Eccentricity' section, the following options are checked: 'X Dir', 'X Dir + Eccentricity', and 'X Dir - Eccentricity'. The 'Ecc. Ratio (All Diaph.)' is set to 0.05. In the 'Factors' section, 'Base Shear Coefficient, C' is set to 0.2128 and 'Building Height Exp., K' is set to 1. In the 'Story Range' section, 'Top Story' is set to Story7 and 'Bottom Story' is set to Story1. There are 'OK' and 'Cancel' buttons at the bottom.

Figura 27. Coeficiente cortante basal, Sismo en X

Ingreso de las propiedades sísmicas en el sentido X. El coeficiente de cortante basal, se utiliza en el análisis del sismo estática, desde la base hasta el nivel más alto de estructura modelada. (Ver figura 27)

The screenshot shows the 'Seismic Load Pattern - User Defined' dialog box. It is divided into three main sections: 'Direction and Eccentricity', 'Factors', and 'Story Range'. In the 'Direction and Eccentricity' section, the following options are checked: 'Y Dir', 'Y Dir + Eccentricity', and 'Y Dir - Eccentricity'. The 'Ecc. Ratio (All Diaph.)' is set to 0.05. In the 'Factors' section, 'Base Shear Coefficient, C' is set to 0.2128 and 'Building Height Exp., K' is set to 1. In the 'Story Range' section, 'Top Story' is set to Story7 and 'Bottom Story' is set to Story1. There are 'OK' and 'Cancel' buttons at the bottom.

Figura 28. Coeficiente cortante basal, Sismo en Y

Ingreso de las propiedades sísmicas en el sentido X. El coeficiente de cortante basal, se utiliza en el análisis del sismo estática, desde la base hasta el nivel más alto de estructura modelada. (Ver figura 28)

- Como último paso para definir el comportamiento sísmico, se puede colocar la función del espectro sísmico dentro del software utilizado, de la siguiente manera.

Response Spectrum Function - Ecuador Norma NEC-SE-DS 2015

Function Name: Function Damping Ratio:

Parameters

Zone Coefficient, Z:
 η Coefficient:
 Site Factor, Fa:
 Site Factor, Fd:
 Soil Type:
 Inelastic Behavior Fctor of Subsurface, Fs:
 Importance Factor, I:
 Response Modification Factor, R:

Define Function

Period	Acceleration
0	0.3095
0.1	0.3095
0.2	0.3095
0.3	0.3095
0.4	0.3095
0.5	0.3095

Plot Options

Linear X - Linear Y
 Linear X - Log Y
 Log X - Linear Y
 Log X - Log Y

Function Graph

Figura 29. Función Espectro de diseño, NEC 2015-Etabs

Definición del espectro de respuesta para el análisis del sismo dinámico, el mismo que se define en función de la zona sísmica y la ubicación geográfica de la estructura en estudio. (Ver figura 29)

La variación entre los valores del sismo Estático y el sismo Pseudo dinámico es por los factores de irregularidad en planta y elevación, ya que la función de espectro sísmico no considera dichos valores.

Ya con todos los valores y cargas definidos, se realiza el análisis de esfuerzos y derivas permitidas, con el fin de establecer que ventajas trae consigo el uso de los aisladores sísmicos en la edificación.

Es importante aclarar, que el modelado del Bloque A del Centro de Investigación de Salud de América Latina de la PUCE, es lo más cercano a la realidad, por lo tanto,

los resultados finales de la estructura no representan el comportamiento real de lo que se encuentra construido.

4.2.3. Resultados Obtenidos

- Relación Demanda/Capacidad columnas y vigas principales

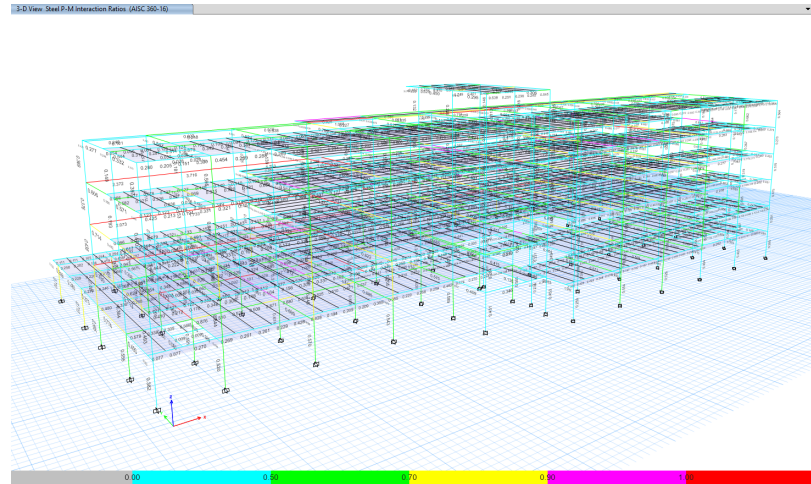


Figura 30. Relación Demanda/Capacidad

Escala de colores que indican la relación demanda/capacidad de los elementos estructurales que componen la edificación. Siendo plomo en nivel más bajo y rojo el más alto, siendo este, el q indica que el elemento esta sobre esforzado y no cumple con las solicitaciones indicadas. (Ver figura 30)

Se evidencia, que existen elementos que no cumplen con la relación de esfuerzos.

- Relación Demanda/Capacidad vigas secundarias



Figura 31. Relación Demanda/Capacidad – Vigas secundarias

Escala de colores que indican la relación demanda/capacidad de los elementos estructurales que componen la edificación. Siendo plomo en nivel más bajo y rojo el más alto, siendo este, el q indica que el elemento esta sobre esforzado y no cumple con las solicitaciones indicadas. (Ver figura 30)

el más alto, siendo este, el q indica que el elemento esta sobre esforzado y no cumple con las solicitaciones indicadas (Ver figura 31)

- Derivas de piso – Sismo X

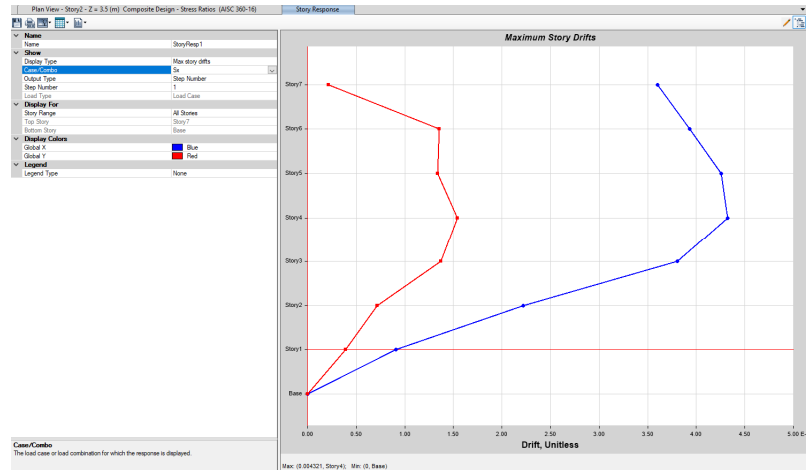


Figura 32. Deriva de piso – Sismo X

Relación desplazamiento/altura entre los diferentes niveles de la estructura modelada por la acción del sismo en sentido X, de acuerdo a normativa, este valor no puede superar el 2%. (Ver figura 32)

$$\Delta_M = 0.75 * R * \Delta_E$$

$$\Delta_M = 0.75 * 5 * 0.004 = 0.015$$

$$0.015 < 0.02 \text{ OK}$$

- Derivas de piso – Sismo Y

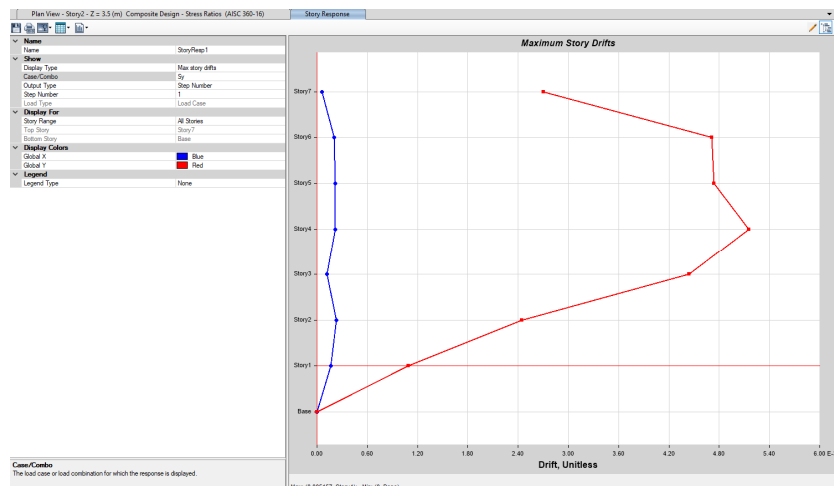


Figura 33. Deriva de piso – Sismo Y

Relación desplazamiento/altura entre los diferentes niveles de la estructura modelada por la acción del sismo en sentido X, de acuerdo a normativa, este valor no puede superar el 2%. (Ver figura 34)

$$\Delta_M = 0.75 * R * \Delta_E$$

$$\Delta_M = 0.75 * 5 * 0.0052 = 0.0195$$

$$0.0195 < 0.02 \text{ OK}$$

La estructura no está modelada con la influencia de la mampostería en el modelo inicial, por lo que cumple con el requisito de deriva, sin embargo, el modelo con aisladores contempla el efecto de la mampostería y su deriva deberá estar por debajo del 1%.

4.3. Diseño del aislador de fricción de triple péndulo (FTP)

4.3.1. Objetivo del uso de Aisladores FTP

El presente caso de estudio tiene como objetivo principal, reducir el desplazamiento lateral de la estructura, consigo la deriva de la misma considerando los efectos de la mampostería.

Se pretende utilizar el aislador que mejor se acople a la edificación, usando aisladores lo más pequeños posibles.

4.3.2. Definición de Ubicación de los aisladores.

El edificio en estudio tiene irregularidad en elevación, por lo tanto, los aisladores se ubican en el primer piso, con el fin de distribuir a todos en el mismo nivel.

En Planta, los aisladores se ubican en cada columna de la edificación y se unen unos con otros con la ayuda de una viga de cimentación en acero estructural, tal como se me muestra en la figura siguiente.

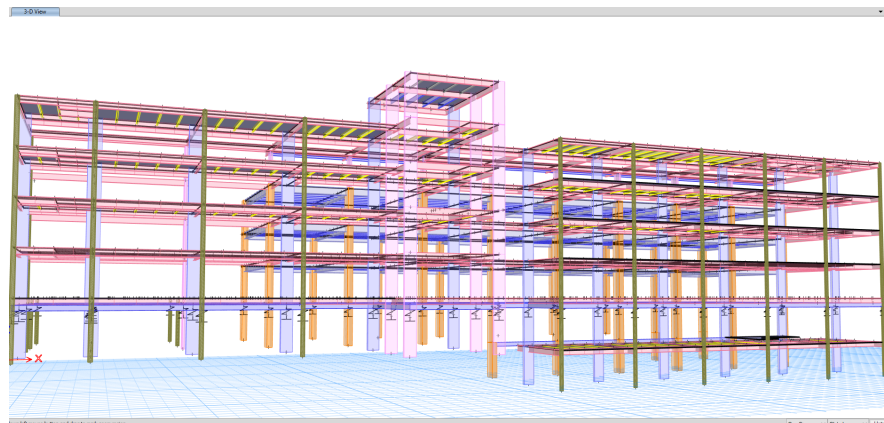


Figura 34. Ubicación en elevación de los aisladores sísmicos

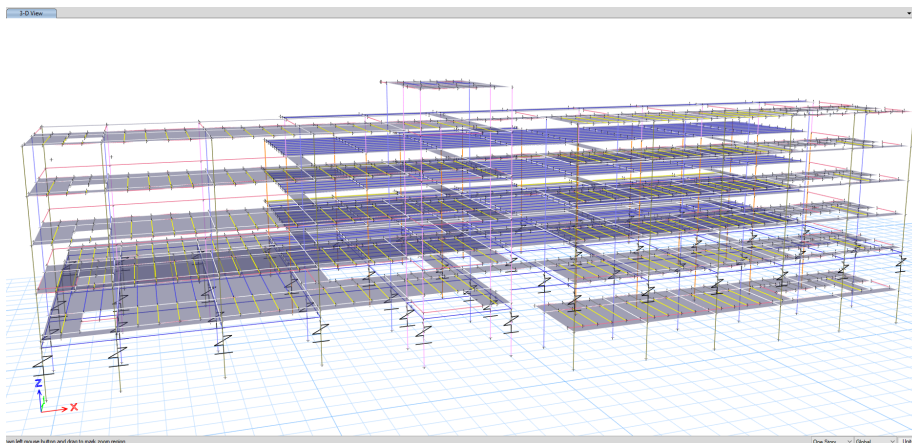


Figura 35. Ubicación en primera planta, por desnivel en elevación

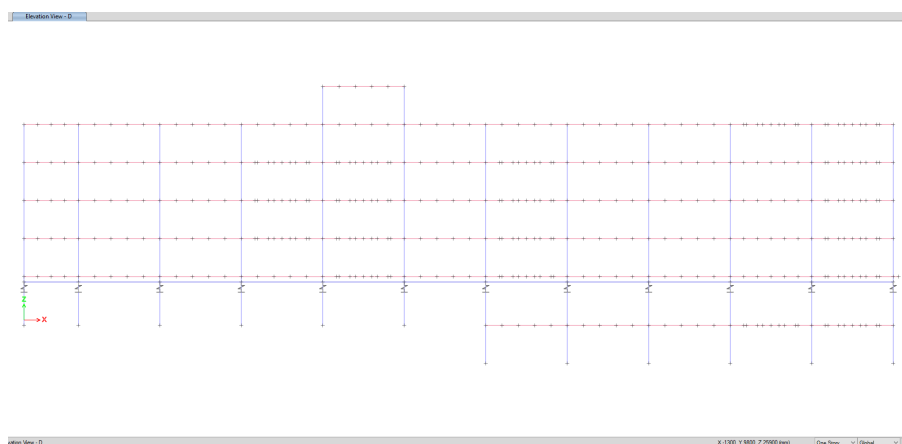


Figura 36. Ubicación en elevación de los aisladores sísmicos

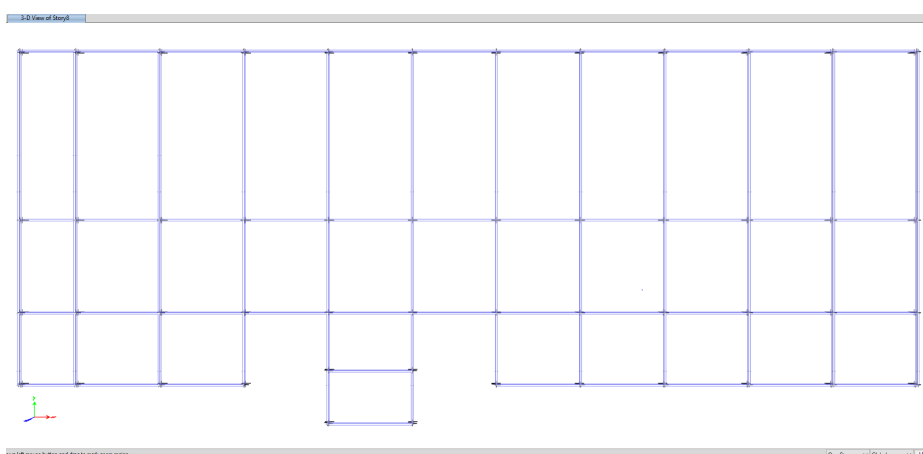


Figura 37. Vista en planta aisladores sísmicos

Figura 34-35-36-37, indican la ubicación en planta y en elevación de los aisladores de triple péndulo, se determinó la mejor ubicación de los mismos en función de la irregularidad en elevación que tiene la estructura analizada.

4.3.3. Contacto con el proveedor-aislador a usarse

El diseño preliminar de los aisladores que se utilizan en el presente trabajo se realiza con el procedimiento propuesto por la ASCE 7-22, el mismo que fue descrito en el apartado 3.3.1., por lo cual es importante contactar al proveedor de los mismos, EPS (Earthquake Protection System), analizando cual es el que mejor se acopla a las necesidades y solicitaciones de la estructura.

Uno de los aisladores que se encuentra del catálogo que ofrece EPS es FPT8833/11-9R/8-7), en el presente trabajo se considera, que este modelo de aislador es el que mejor se acopla a las solicitaciones de la estructura.

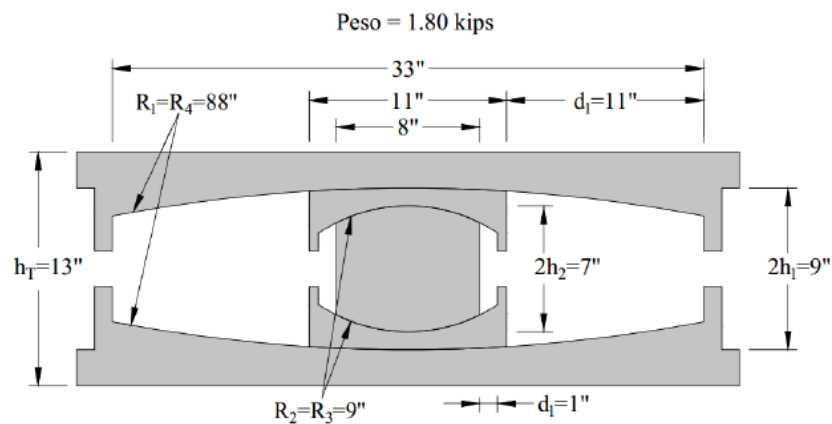


Figura 38. Geometría del aislador FPT8833

Aislador de triple péndulo FPT8833, con sus características geométricas, este aislador será utilizado dentro del análisis estructural de la edificación estudiada. (Ver figura 38)

4.3.4. Factores de fricción del aislador FPT8833

Los coeficientes de fricción es una de las propiedades más importantes de los aisladores, por lo que se toman como dato inicial, los indicados por el proveedor.

Es importante, conocer, que no siempre se dispone de los datos del proveedor, por lo tanto, para el presente análisis, se aplicaran las ecuaciones indicadas en el apartado 3.3.1., literal C, del presente documento.

4.4. Aplicación Método Fuerza Lateral Equivalente

Una de las principales características del método de fuerza lateral equivalente, es que es un proceso iterativo, partiendo de un desplazamiento $D_{M(\text{inicial})}$ asumido, el cual es necesario para la obtención de los diferentes valores estipulados en la ASCE 7-22.

Una vez que se obtiene los valores del sistema de aislación se recalcula el valor de $D_{M(\text{final})}$. El proceso de iteración termina cuando se obtiene valores muy similares entre $D_{M(\text{inicial})}$ y $D_{M(\text{final})}$.

Cálculo Desplazamiento máximo

Partiendo de las características del aislador FPT8833, se puede obtener los valores d_1 , d_2 , d_3 y d_4 .

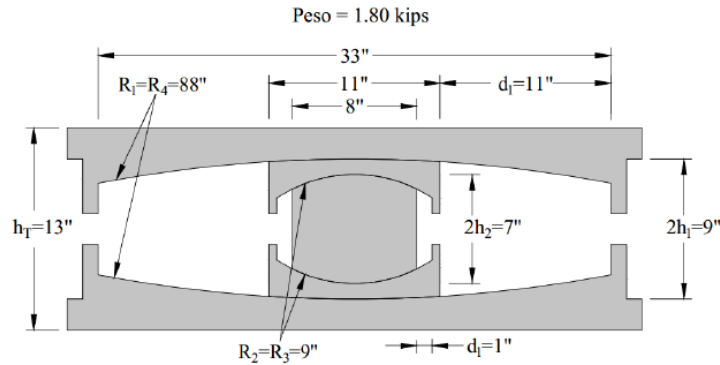


Figura 39. Geometría del aislador FPT8833

Aislador de triple péndulo FPT8833, con sus características geométricas, este aislador será utilizado dentro del análisis estructural de la edificación estudiada. (Ver figura 39)

R1=R4	88	in	2235	mm
R2=R3	9	in	228,6	mm
h1=h4	4,5	in	114,3	mm
h2=h3	3,5	in	88,9	mm
d1=d4	11	in	279,4	mm
d2=d3	1	in	25,4	mm

Tabla 16. Parámetros del aislador FPT8833

Con la ayuda de estas características se definen parámetros geométricos del aislador.

$$R_{ieff} = R_i - h_i$$

R1eff=R4eff	2120,9	mm
R2eff=R3eff	139,7	mm

Tabla 17. Radios efectivos aislador

$$d_i^* = d_i * \frac{R_{ieff}}{R_i}$$

d1*=d4*	265,11	mm
d2*=d3*	15,52	mm

Tabla 18. Distancias efectivas aislador

Cálculo de las propiedades de fricción

Utilizando las ecuaciones descritas en el apartado 3.3.1 del presente documento se obtiene los coeficientes de fricción Lower Bound y Upper Bound, tanto de las superficies externas, como de las superficies internas.

$$\mu_{3c} = 0.122 - 0.01p$$

$$p = \frac{F}{A}$$

Donde P, corresponde a la carga que soporta cada columna, en el caso de estudio se dispone de 47 columnas y el peso total de la estructura es de 43784.10 kN.

E Base Reactions

Output Case	Case Type	Step Type	FX kN	FY kN	FZ kN
Dead	LinStatic		0	0	31517,0645
S.Dead	LinStatic		0	0	12267,0408

Figura 40. Peso Muerto y Sobre carga de la estructura analizada

Reacciones en la base en función del peso de la estructura y la carga muerta sobre impuesta, esta carga representa el peso sísmico de la estructura. (Ver figura 40)

F=	206.2060883	kip
DS=	11	in
p=	2.169832612	
μ3c=	0.100301674	
μ1= μ4	0.085301674	
μ1= μ4	0.11873993	

Tabla 19. Coeficientes de fricción superficies externas

F=	206.2060883	kip
DR=	8	in
p=	4.102339782	
μ_{3c} =	0.080976602	
$\mu_2 = \mu_3$	0.065976602	
$\mu_2 = \mu_3$	0.09183943	

Tabla 20. Coeficientes de fricción superficies internas

Cálculo de la resistencia y rigidez post-elástica

Se debe conocer el peso total de la estructura, $W = 43111.22$ kN y los coeficientes Upper Bound del aislador.

$$Q_d = \mu * W$$

$$\mu = \mu_1 - (\mu_1 - \mu_2) \frac{R_{2eff}}{R_{1eff}}$$

μ =	0,1164	****
Qd=	5021,12	kN

$$Kd = \frac{W}{2R_{1eff}}$$

Kd=	10,163	kN/mm
-----	--------	-------

Cálculo del desplazamiento de fluencia

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

Y=	3,82	mm
----	------	----

Cálculo aproximado de DM

Se conoce que el Centro de Investigación de Salud de América Latina de la PUCE, se encuentra ubicado en la parroquia rural de Nayón, por lo que, usando la herramienta de la página del Instituto Geofísico de la Politécnica Nacional (IGEPN), se puede conocer los valores correspondientes a sus características sísmicas.

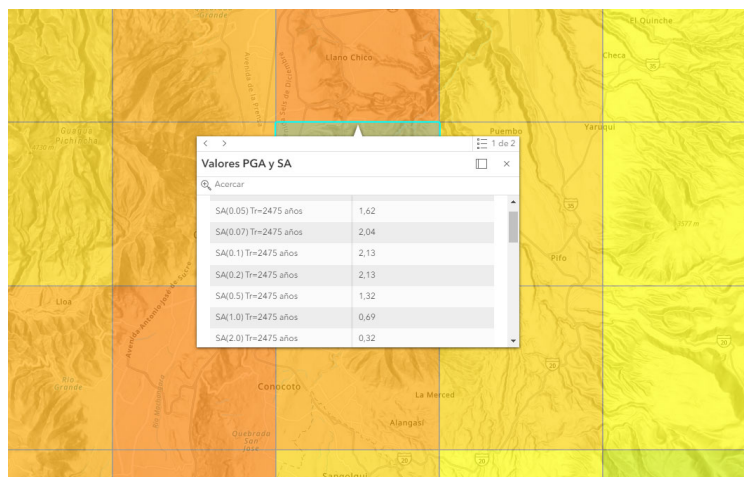


Figura 41. Valores Ss y S1 – IGEPN

Valores sísmicos en función de su ubicación geográfica, Ss (aceleración espectral a periodo de 0.2s para el MCE) y S1 (aceleración espectral a periodo de 1s para el MCE). Dentro de la página oficial del Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional, se puede obtener estos valores para todo el territorio ecuatoriano (Ver figura 41)

El análisis sísmico que se aplicara a la estructura analizada con el uso de aisladores sísmicos es el que establece la ASCE 7-22, por lo tanto, los valores que corresponden a Ss es la aceleración espectral a periodos de 0.2 seg, mientras que el valor de S1, es la aceleración espectral a periodos de 1s.

S_{DS} se obtiene al multiplicar 2/3 * S_{MS}, siendo S_{DS}= 1.42, además, del modelo de la estructura con base fija se conoce que el periodo es igual a 0.82 s.

$$D_M = \frac{S_{DS} * g}{\left(\frac{2\pi}{T}\right)^2}$$

D _M =	237.26	mm
------------------	--------	----

Cálculo parámetros ASCE 7-22

- Rigidez efectiva K_M

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

$$k_M = k_d + \frac{Q_d}{D_M}$$

K _M =	31.32	kN/mm
------------------	-------	-------

- Periodo efectivo T_M

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

$T_M =$	2.35	s
---------	------	---

- Amortiguamiento efectivo β_M

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

$$\beta_M = \frac{2Q_d(D_M - Y)}{\pi k_M D_M^2}$$

$\beta_M =$	0.423
-------------	-------

- Factor de amortiguamiento efectivo B_M

Se realiza una interpolación de acuerdo a la Tabla 17.5.1 de la ASCE 7-22, utilizando el valor de β_M .

Table 17.5-1 Damping Factor, B_M	
Effective Damping, β_M (percentage of critical) ^{a,b}	B_M Factor
≤2	0.8
5	1.0
10	1.2
20	1.5
30	1.7
40	1.9
≥50	2.0

$\beta_{M1} =$	0.4	B_{M1}	1.9
$\beta_{M2} =$	0.5	B_{M2}	2.0

$B_{M(\text{Interpolado})} =$	1,923
-------------------------------	-------

- Desplazamiento máximo D_M

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

$S_{M1} =$	1.17
$D_M =$	355.77

Al comparar el D_M preliminar con el D_M máximo, se tiene una diferencia de 118.51 mm, por lo tanto, no se acepta el valor y se debe realizar otra iteración.

Para lograr una variación menor entre el D_M preliminar y el D_M máximo, el valor final de la última iteración corresponde a $D_M = 487.25$, y las propiedades q resultan de este valor son las siguientes:

K_M	20.48	kN/mm
T_M	2.91	s
β_M	0.318	
B_M	1.736	

Tabla 21. Resultados método fuerza lateral equivalente

Cálculo cortante basal y desplazamiento

El cortante basal para el sistema de aislación y los elementos estructurales bajo el nivel de base, se calcula con la siguiente expresión:

$$V_b = K_M D_M$$

$V_b =$	2243.83	kip
---------	---------	-----

El cortante basal para elementos estructurales que están sobre el nivel de base, se calcula con la siguiente expresión:

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

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

V_{st}	2196.25	kips
V_s	1098.13	kips

4.5. Aplicación Método Análisis Sísmico Moderno según (Chávez, 2006)

- Para la aplicación de este método se debe idealizar la estructura como un pórtico en 2 dimensiones, el mismo que tendrá 12 columnas y 4 pisos.

Los datos que corresponden al edificio de estudio son los siguientes:

Datos:

$$g := 981 \cdot \frac{cm}{s^2}$$

$$E := 2100000 \cdot \frac{kg}{cm^2}$$

$$I := 55685.53 \cdot cm^4$$

$$L1 := 350 \cdot cm \quad L2 := 350 \cdot cm \quad L3 := 350 \cdot cm \quad L4 := 350 \cdot cm$$

$$W1 := 679027.78 \cdot kg \quad W2 := 679027.78 \cdot kg \quad W3 := 679027.78 \cdot kg$$

$$W4 := 679027.78 \cdot kg \quad Wb := 19540.76 \cdot kg$$

- Una vez que se conoce el peso de cada piso y de la base aislada se procede a calcular la rigidez de cada piso de la estructura.

$$K1 := 12 \cdot E \cdot \frac{I}{L1^3} = (3.273 \cdot 10^4) \frac{kg}{cm}$$

$$K2 := 12 \cdot E \cdot \frac{I}{L2^3} = (3.273 \cdot 10^4) \frac{kg}{cm}$$

$$K3 := 12 \cdot E \cdot \frac{I}{L3^3} = (3.273 \cdot 10^4) \frac{kg}{cm}$$

$$K4 := 12 \cdot E \cdot \frac{I}{L4^3} = (3.273 \cdot 10^4) \frac{kg}{cm}$$

$$Kb := 7250.618 \frac{kg}{cm}$$

Matriz de Masa y Rigideces base fija

$$M := \begin{bmatrix} \frac{Wb}{g} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{W1}{g} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{W2}{g} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{W3}{g} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{W4}{g} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 19.919 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 692.179 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 692.179 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 692.179 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 692.179 \end{bmatrix} \frac{s^2 \cdot kg}{cm}$$

$$K := \begin{bmatrix} Kb + 12 K1 & -12 K1 & 0 & 0 & 0 \\ -12 K1 & 12 K1 + 12 K2 & -12 K2 & 0 & 0 \\ 0 & -12 K2 & 12 K2 + 12 K3 & -12 K3 & 0 \\ 0 & 0 & -12 K3 & 12 K3 + 12 K4 & -12 K4 \\ 0 & 0 & 0 & -12 K4 & 12 K4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4 \cdot 10^5 & -3.928 \cdot 10^5 & 0 & 0 & 0 \\ -3.928 \cdot 10^5 & 7.855 \cdot 10^5 & -3.928 \cdot 10^5 & 0 & 0 \\ 0 & -3.928 \cdot 10^5 & 7.855 \cdot 10^5 & -3.928 \cdot 10^5 & 0 \\ 0 & 0 & -3.928 \cdot 10^5 & 7.855 \cdot 10^5 & -3.928 \cdot 10^5 \\ 0 & 0 & 0 & -3.928 \cdot 10^5 & 3.928 \cdot 10^5 \end{bmatrix} \frac{kg}{cm}$$

$$KC := \begin{bmatrix} 12 K1 & -12 K1 & 0 & 0 & 0 \\ -12 K1 & 12 K1 + 12 K2 & -12 K2 & 0 & 0 \\ 0 & -12 K2 & 12 K2 + 12 K3 & -12 K3 & 0 \\ 0 & 0 & -12 K3 & 12 K3 + 12 K4 & -12 K4 \\ 0 & 0 & 0 & -12 K4 & 12 K4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3.928 \cdot 10^5 & -3.928 \cdot 10^5 & 0 & 0 & 0 \\ -3.928 \cdot 10^5 & 7.855 \cdot 10^5 & -3.928 \cdot 10^5 & 0 & 0 \\ 0 & -3.928 \cdot 10^5 & 7.855 \cdot 10^5 & -3.928 \cdot 10^5 & 0 \\ 0 & 0 & -3.928 \cdot 10^5 & 7.855 \cdot 10^5 & -3.928 \cdot 10^5 \\ 0 & 0 & 0 & -3.928 \cdot 10^5 & 3.928 \cdot 10^5 \end{bmatrix} \frac{kg}{cm}$$

- Con la matriz de rigidez, se obtiene los valores y vectores propios de las matrices de masa y rigidez con la ayuda del software Mathcad.

$$w_{cuadrado} := \text{genvals}(K, M) = \begin{bmatrix} 2.065 \cdot 10^4 \\ 1.934 \cdot 10^3 \\ 1.129 \cdot 10^3 \\ 332.768 \\ 2.514 \end{bmatrix}$$

$$A := K^{-1} \cdot M = \begin{bmatrix} 0.003 & 0.095 & 0.095 & 0.095 & 0.095 \\ 0.003 & 0.097 & 0.097 & 0.097 & 0.097 \\ 0.003 & 0.097 & 0.099 & 0.099 & 0.099 \\ 0.003 & 0.097 & 0.099 & 0.101 & 0.101 \\ 0.003 & 0.097 & 0.099 & 0.101 & 0.103 \end{bmatrix} s^2$$

$$T := \begin{bmatrix} 2 \cdot \frac{\pi}{w_0} \\ 2 \cdot \frac{\pi}{w_1} \\ 2 \cdot \frac{\pi}{w_2} \\ 2 \cdot \frac{\pi}{w_3} \\ 2 \cdot \frac{\pi}{w_4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3.963 \\ 0.344 \\ 0.187 \\ 0.143 \\ 0.044 \end{bmatrix} s$$

$$w := \left(\frac{1}{\text{eigenvals}(A)} \right)^{0.5} = \begin{bmatrix} 1.586 \\ 18.242 \\ 33.603 \\ 43.975 \\ 143.718 \end{bmatrix} \frac{1}{s}$$

- Calculo de la matriz de amortiguamiento con $\zeta_f = 0.05$

Matriz de amortiguamiento:

$$\zeta_f := 0.05$$

$$a1 := \zeta_f \cdot \frac{2}{w_0} = 0.063 \text{ s}$$

$$c := a1 \cdot KC = \begin{bmatrix} 2.477 \cdot 10^4 & -2.477 \cdot 10^4 & 0 & 0 & 0 \\ -2.477 \cdot 10^4 & 4.954 \cdot 10^4 & -2.477 \cdot 10^4 & 0 & 0 \\ 0 & -2.477 \cdot 10^4 & 4.954 \cdot 10^4 & -2.477 \cdot 10^4 & 0 \\ 0 & 0 & -2.477 \cdot 10^4 & 4.954 \cdot 10^4 & -2.477 \cdot 10^4 \\ 0 & 0 & 0 & -2.477 \cdot 10^4 & 2.477 \cdot 10^4 \end{bmatrix} \text{ s} \cdot \frac{\text{kg}}{\text{cm}}$$

- Para el sistema de base aislada, se utiliza el valor de amortiguamiento que se obtuvo por el método de la fuerza lateral equivalente de la ASCE 7-22 y se confirma que el periodo obtenido por los dos métodos es similar mas no igual.

Sistema Base Aislada:

$$\zeta_b := 0.36$$

$$wb := \sqrt{\frac{Kb}{\left(\frac{W1}{g} + \frac{W2}{g} + \frac{W3}{g} + \frac{W4}{g}\right) + \frac{Wb}{g}}} = 1.612 \frac{1}{\text{s}}$$

$$Tb := 2 \cdot \frac{\pi}{wb} = 3.897 \text{ s}$$

$$cb := \zeta_b \cdot 2 \cdot \left(\frac{W1}{g} + \frac{W2}{g} + \frac{W3}{g} + \frac{W4}{g} + \frac{Wb}{g}\right) \cdot wb = (3.238 \cdot 10^3) \text{ kg} \cdot \frac{\text{s}}{\text{cm}}$$

$$cb_m := \begin{bmatrix} cb & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$c_aisl := c + cb_m = \begin{bmatrix} 28008.248 & -24770.702 & 0 & 0 & 0 \\ -24770.702 & 49541.404 & -24770.702 & 0 & 0 \\ 0 & -24770.702 & 49541.404 & -24770.702 & 0 \\ 0 & 0 & -24770.702 & 49541.404 & -24770.702 \\ 0 & 0 & 0 & -24770.702 & 24770.702 \end{bmatrix} \text{ kg} \cdot \frac{\text{s}}{\text{cm}}$$

$$\phi := \text{eigenvecs}(A) = \begin{bmatrix} 0.435 & 0.546 & 0.456 & -0.273 & 1 \\ 0.443 & 0.547 & 0.438 & -0.252 & -0.029 \\ 0.449 & 0.227 & -0.452 & 0.627 & 8.46 \cdot 10^{-4} \\ 0.453 & -0.226 & -0.443 & -0.632 & -2.461 \cdot 10^{-5} \\ 0.455 & -0.547 & 0.447 & 0.262 & 6.952 \cdot 10^{-7} \end{bmatrix}$$

$$\phi n1 := \frac{\phi^{(0)}}{\phi_{0,0}} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1.018 \\ 1.032 \\ 1.041 \\ 1.046 \end{bmatrix} \quad \phi n2 := \frac{\phi^{(1)}}{\phi_{0,1}} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1.002 \\ 0.416 \\ -0.414 \\ -1.001 \end{bmatrix}$$

$$\phi n3 := \frac{\phi^{(2)}}{\phi_{0,2}} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0.961 \\ -0.99 \\ -0.971 \\ 0.981 \end{bmatrix} \quad \phi n4 := \frac{\phi^{(3)}}{\phi_{0,3}} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0.92 \\ -2.296 \\ 2.313 \\ -0.96 \end{bmatrix}$$

$$\phi n5 := \frac{\phi^{(4)}}{\phi_{0,4}} = \begin{bmatrix} 1 \\ -0.029 \\ 8.489 \cdot 10^{-4} \\ -2.572 \cdot 10^{-5} \\ 1.146 \cdot 10^{-6} \end{bmatrix}$$

DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE FUERZAS SÍSMICAS

$$s := M \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 19.919 \\ 692.179 \\ 692.179 \\ 692.179 \\ 692.179 \end{bmatrix} \frac{\text{kg}}{\text{cm}} \cdot \text{s}^2$$

$$\Phi := \begin{bmatrix} \phi n1_0 & \phi n2_0 & \phi n3_0 & \phi n4_0 & \phi n5_0 \\ \phi n1_1 & \phi n2_1 & \phi n3_1 & \phi n4_1 & \phi n5_1 \\ \phi n1_2 & \phi n2_2 & \phi n3_2 & \phi n4_2 & \phi n5_2 \\ \phi n1_3 & \phi n2_3 & \phi n3_3 & \phi n4_3 & \phi n5_3 \\ \phi n1_4 & \phi n2_4 & \phi n3_4 & \phi n4_4 & \phi n5_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1.018 & 1.002 & 0.961 & 0.92 & -0.029 \\ 1.032 & 0.416 & -0.99 & -2.296 & 8.464 \cdot 10^{-4} \\ 1.041 & -0.414 & -0.971 & 2.313 & -2.462 \cdot 10^{-5} \\ 1.046 & -1.001 & 0.981 & -0.96 & 6.955 \cdot 10^{-7} \end{bmatrix}$$

MATRIZ DE MASA MODAL

$$M_{\text{modal}} := \Phi^T \cdot M \cdot \Phi = \begin{bmatrix} 2983.184 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1645.79 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2656.938 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 8595.269 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 20.506 \end{bmatrix} \frac{\text{kg} \cdot \text{s}^2}{\text{cm}}$$

Factor de Contribución

$$Tn1 := \frac{\phi n1^T \cdot s}{Mmodal_{0,0}} = 0.967$$

$$Tn2 := \frac{\phi n2^T \cdot s}{Mmodal_{1,1}} = 0.013$$

$$Tn3 := \frac{\phi n3^T \cdot s}{Mmodal_{2,2}} = 0.002$$

$$Tn4 := \frac{\phi n4^T \cdot s}{Mmodal_{3,3}} = 0$$

$$Tn5 := \frac{\phi n5^T \cdot s}{Mmodal_{4,4}} = 0.017$$

Contribución de los modos de vibración

$$Sn1 := Tn1 \cdot M \cdot \phi n1 = \begin{bmatrix} 19.258 \\ 681.46 \\ 690.709 \\ 696.898 \\ 700 \end{bmatrix} \text{ kg} \cdot \frac{\text{s}^2}{\text{cm}}$$

$$Sn2 := Tn2 \cdot M \cdot \phi n2 = \begin{bmatrix} 0.264 \\ 9.178 \\ 3.81 \\ -3.793 \\ -9.171 \end{bmatrix} \text{ kg} \cdot \frac{\text{s}^2}{\text{cm}}$$

$$Sn3 := Tn3 \cdot M \cdot \phi n3 = \begin{bmatrix} 0.048 \\ 1.608 \\ -1.657 \\ -1.624 \\ 1.641 \end{bmatrix} \text{ kg} \cdot \frac{\text{s}^2}{\text{cm}}$$

$$Sn4 := Tn4 \cdot M \cdot \phi n4 = \begin{bmatrix} 0.009 \\ 0.278 \\ -0.693 \\ 0.698 \\ -0.29 \end{bmatrix} \text{ kg} \cdot \frac{\text{s}^2}{\text{cm}}$$

$$Sn5 := Tn5 \cdot M \cdot \phi n5 = \begin{bmatrix} 0.341 \\ -0.345 \\ 0.01 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ kg} \cdot \frac{\text{s}^2}{\text{cm}}$$

$$mesclar := \frac{W1}{g} + \frac{W2}{g} + \frac{W3}{g} + \frac{W4}{g} = (2.769 \cdot 10^3) \text{ kg} \cdot \frac{s^2}{cm}$$

$$S1 := S_{n1} = \begin{bmatrix} 19.258 \\ 681.46 \\ 690.709 \\ 696.898 \\ 700 \end{bmatrix} \frac{s^2}{cm} \cdot kg \quad Vbst1 := S1_1 + S1_2 + S1_3 + S1_4 = (2.769 \cdot 10^3) \frac{s^2}{cm} \cdot kg$$

$$S2 := S_{n2} = \begin{bmatrix} 0.264 \\ 9.178 \\ 3.81 \\ -3.793 \\ -9.171 \end{bmatrix} \frac{s^2}{cm} \cdot kg \quad Vbst2 := S2_1 + S2_2 + S2_3 + S2_4 = 0.025 \frac{s^2}{cm} \cdot kg$$

$$S3 := S_{n3} = \begin{bmatrix} 0.048 \\ 1.608 \\ -1.657 \\ -1.624 \\ 1.641 \end{bmatrix} \frac{s^2}{cm} \cdot kg \quad Vbst3 := S3_1 + S3_2 + S3_3 + S3_4 = -0.033 \frac{s^2}{cm} \cdot kg$$

$$S4 := S_{n4} = \begin{bmatrix} 0.009 \\ 0.278 \\ -0.693 \\ 0.698 \\ -0.29 \end{bmatrix} \frac{s^2}{cm} \cdot kg \quad Vbst4 := S4_1 + S4_2 + S4_3 + S4_4 = -0.007 \frac{s^2}{cm} \cdot kg$$

$$S5 := S_{n5} = \begin{bmatrix} 0.341 \\ -0.345 \\ 0.01 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \frac{s^2}{cm} \cdot kg \quad Vbst5 := S5_1 + S5_2 + S5_3 + S5_4 = -0.335 \frac{s^2}{cm} \cdot kg$$

$$Vbst := Vbst1 + Vbst2 + Vbst3 + Vbst4 = (2.769 \cdot 10^3) \frac{s^2}{cm} \cdot kg$$

$$Vbstf := Vbst \cdot \frac{g}{2} = 1358219.872 \text{ kg}$$

$$Vbstf(kip) := Vbstf \cdot 0.0022 \cdot \frac{kip}{kg} = 2988.084 \text{ kip}$$

- El valor que se obtiene del cortante Vb, es similar al obtenido en el procedimiento expuesto en la ASCE 7-22

4.6. Cálculo de las Propiedades en el software Etabs de los aisladores de triple péndulo.

Un método aproximado que suele ser usada para determinar el comportamiento de los aisladores de triple péndulo, es el modelo bilineal, sin embargo, con la ayuda del software Etabs, mediante la función Link (Friction Isolator), se puede representar este modelo.

Para el análisis del comportamiento de los aisladores, se han desarrollado dos métodos de análisis, el modelo en serie y el modelo en paralelo.

El modelo en serie es aplicable al cumplirse las siguientes condiciones: $R_{ef1} = R_{ef4}$,
 $R_{ef2} = R_{ef3}$, $d_1 = d_4$, $d_2 = d_3$, $\mu_1 = \mu_4$ y $\mu_2 = \mu_3$.

Cuando se presentan estas características en el aislador, se puede simplificar las fases de movimiento del mismo a 3 fases, sin embargo, el modelo en paralelo, solo analiza las dos primeras fases de movimiento, con lo cual no se obtiene resultados aproximados a un comportamiento real de la estructura.

Otro modelo que permite conocer cómo se comporta una estructura al tener un sistema de aislamiento, es el modelo en serie, el cual permite representar las 5 fases de movimiento que dispone el aislador de triple péndulo.

La ventaja de este modelo, es que el software Etabs, dentro de sus características de diseño ya tiene incorporado este modelo matemático, por lo tanto, el uso del mismo para el análisis de la estructura es viable, permitiendo obtener resultados bastantes aproximados al comportamiento real que tendrá la estructura al disponer un sistema con aislamiento de base.

En el software Etabs, la función que permite representar el modelo en serie, es el elemento link TRIPLE PENDULUM ISOLATOR (TPI). La versión que se utiliza para el análisis es Etabs V21.1.0.

4.6.1. Datos generales del aislador.

Como se explicó en el apartado 4.3.3 el aislador a utilizarse en el FPT8833, el mismo que tiene las siguientes características:

- Peso del aislador (W): 8 kN
- Masa del aislador (m): W (kips)/g (in/s²), $0,000823 \text{ kN} \cdot \frac{\text{s}^2}{\text{mm}}$
- Inercia en los ejes horizontales

$$r = 419 \text{ mm}$$

$$I_x = I_y = \frac{mr^2}{4} = 36,12 \text{ kN} \cdot \text{mm} \cdot \text{s}^2$$

- Inercia eje vertical

$$I_z = \frac{mr^2}{2} = 72,24 \text{ kN} \cdot \text{mm} \cdot \text{s}^2$$

En la siguiente figura, se indica el ingreso de estos valores en Etabs.

Figura 42. Propiedades generales del aislador FPT8833 - Etabs

Ingreso de las propiedades de Masa, peso e inercia del aislador FPT8833, en el software Etabs. (Ver figura 42)

4.6.2. Propiedades específicas en cada dirección

Propiedades en la dirección U1

Para el cálculo de la rigidez vertical del aislador se asume que el aislador es un cilindro de diámetro igual a D_R , y tiene una altura h_T , la cual corresponde al alto total del aislador.

$$K_v = \frac{EA_R}{h_T}$$

$$K_v = \frac{\frac{\pi D^2}{4} * E}{h_T}$$

- E: Módulo de elasticidad del acero (29000 kip/in – 210000 Mpa).
- A_R : área de la sección transversal del cilindro $D_R= 8\text{in}$, 203,2 mm
- h_T : Altura total del aislador, $h_T= 13\text{ in}$, 330,2 mm

$$K_v = \frac{\pi * 203.2mm^2}{4} * 210000 Mpa$$

$$K_v = 20624314.11 kN/mm$$

A continuación, se muestra el ingreso de esta propiedad en el software Etabs, este valor es el mismo tanto para las propiedades lineales, como para las no lineales.

El valor de la rigidez lineal se utiliza con el fin de realizar el análisis de cargas gravitacionales.

Figura 43. Propiedades en la dirección U1 del aislador FPT8833 – Etabs

Propiedades del aislador FTP8833 en dirección U1, se ingresa el valor de la rigidez efectiva tanto para las propiedades lineales como no lineales. (Ver figura 43)

Propiedades en la dirección U2 y U3

Para el cálculo de las propiedades en las direcciones U2 y U3, se determina en primera instancia la rigidez efectiva (k_{eff}), la cual está en función de kM y el número de columnas total que tiene la estructura.

Adicional, se determina el valor del amortiguamiento efectivo (ζ_{eff}), para lo cual, por facilidad de diseño se toma el peso de la columna más cargada en el modelo.

Rigidez efectiva:

$$k_{eff} = \frac{kM}{\# \text{ columnas}}$$

$$k_{eff} = \frac{20.56}{47}$$

$$k_{eff} = 0.4375$$

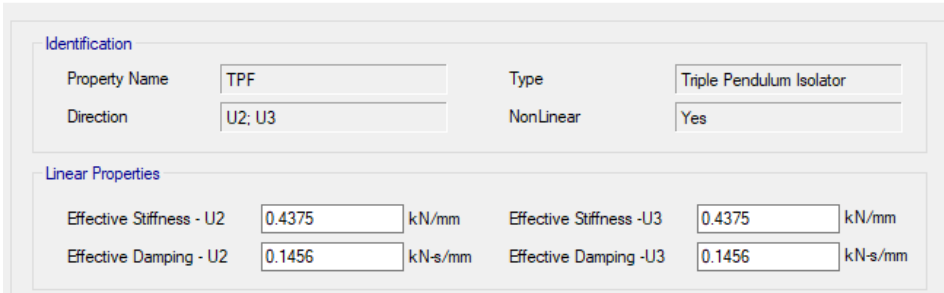
Amortiguamiento Efectivo:

$$c = \zeta * 2 \sqrt{k * \frac{W}{g}}$$

- ζ : Amortiguamiento, coincide con el ultimo valor obtenido de β una vez terminado el proceso iterativo, explicado en el apartado 4.4 del presente documento.
- W : Peso de la columna mas crítica de la estructura analizada
- k : Rigidez efectiva
- g : Gravedad

$$c = 0.36 * 2 * \sqrt{0.4375 * \frac{917.22 \text{ kN}}{9810 \frac{\text{kN}}{\text{mm}^2}}}$$
$$c = 0.1456 \frac{\text{kN}}{\text{mm}}$$

En la figura, se indica el ingreso de las propiedades lineales del aislador.



Link/Support Directional Properties			
Identification			
Property Name	TPF	Type	Triple Pendulum Isolator
Direction	U2; U3	NonLinear	Yes
Linear Properties			
Effective Stiffness - U2	0.4375 kN/mm	Effective Stiffness - U3	0.4375 kN/mm
Effective Damping - U2	0.1456 kN-s/mm	Effective Damping - U3	0.1456 kN-s/mm

Figura 44. Propiedades lineales en dirección U2 y U3 del aislador FPT8833 – Etabs

Definición de los valores de rigidez y amortiguamiento del aislador FPT8833, en dirección U2 y U3. Los valores son iguales debido a que se asume simetría en la superficie superior e inferior. (Ver figura 44)

La definición de las propiedades no lineales en dirección U2 y U3, se resumen en la tabla 21, y se asume que las superficies superiores e inferiores son simétricas, por lo tanto, $h_1=h_4$ y $h_2=h_3$.

- Geometría del aislador FPT8833

R1=R4	88	in	2235	mm
R2=R3	9	in	228.6	mm
h1=h4	4.5	in	114.3	mm
h2=h3	3.5	in	88.9	mm
d1=d4	11	in	279.4	mm
d2=d3	1	in	25.4	mm
Reff1=Reff4	83.5	in	2120.9	mm
Reff2=Reff3	5.5	in	139.7	mm

Tabla 22. Propiedades geométricas del aislador FPT8833

- Propiedades no lineales

PROPIEDAD	FÓRMULA	OUTER TOP	INNER TOP
Rigidez (Stiffness)	$K = \frac{Q_d}{Y} = \frac{\mu i W}{Y}$	28.98	22.42
Coeficiente de fricción lento	$\mu_{1, outer top}$ $\mu_{2, inner top}$	0.11874	0.09184
Coeficiente de fricción rápido	$2\mu_{1, outer top}$ $2\mu_{2, inner top}$	0.23748	0.18368
Rate parameter	$\frac{C. mov. rápido}{C. mov. lento}$	0.5	*****
Radios efectivos	$R_{eff1, outer top}$ $R_{eff2, inner top}$	2120.9	139.7
Distancia de parada	$2Y + 2d_1^*, outer top$ $2Y, inner top$	537.7	7.5

Tabla 23. Propiedades no lineales del aislador FPT8833

Link/Support Directional Properties

Identification

Property Name: TPF Type: Triple Pendulum Isolator

Direction: U2; U3 NonLinear: Yes

Linear Properties

Effective Stiffness - U2: 0.4375 kN/mm Effective Stiffness - U3: 0.4375 kN/mm

Effective Damping - U2: 0.1456 kN-s/mm Effective Damping - U3: 0.1456 kN-s/mm

Shear Deformation Location

Distance from End-J - U2: 150 mm Distance from End-J - U3: 150 mm

Height and Symmetry of Sliding Surfaces

Height for Outer Surfaces: 114.3 mm Outer Bottom Surface is Symmetric to Outer Top Surface

Height for Inner Surfaces: 88.9 mm Inner Bottom Surface is Symmetric to Inner Top Surface

Nonlinear Properties for Directions U2 and U3

	Outer Top	Outer Bottom	Inner Top	Inner Bottom	
Stiffness	28.98	28.98	22.42	22.42	kN/mm
Friction Coefficient, Slow	0.1187	0.1187	0.09184	0.09184	
Friction Coefficient, Fast	0.23748	0.23748	0.18368	0.18368	
Rate Parameter	0.5	0.5	0.5	0.5	sec/mm
Radius of Sliding Surface	2120.9	2120.9	139.7	139.7	mm
Stop Distance	537.7	537.7	7.5	7.5	mm

OK Cancel

Figura 45. Propiedades no lineales en dirección U2 y U3 del aislador FPT8833 – Etabs

Ingreso de propiedades lineales y no lineales del aislador FPT8833, mismos que se calculan con las fórmulas tabuladas en la tabla 23. (Ver figura 45)

4.7. Comportamiento de la estructura al utilizar aisladores sísmicos

El uso del aislador FPT8833, en el Centro de Investigación de Salud de América Latina de la PUCE, logra cambiar las condiciones de rigidez y desplazamiento que sufre la estructura.

Si bien, la estructura al analizarla de manera tradicional, cumple con parámetros de diseños establecidos en Norma, al usar aisladores sísmicos la estructura denota principales reducciones en el análisis de derivas, por lo tanto, presenta un mejor comportamiento al estar sometida a la acción del sismo.

- Ingreso de Sismo en función de lo estipulado en la ASCE 7-22

Los valores de S_s y S_1 se obtiene usando la herramienta de la página del Instituto Geofísico de la Politécnica Nacional (IGEPN).

$S_s = 2.13$ (Aceleración espectral $t = 0.2s$ para el MCE)

$S_1 = 0.69$ (Aceleración espectral $t = 1.0s$ para el MCE)

Tipo de suelos "D" (Asumido)

Los coeficientes de sitio F_a y F_v , están en función del tipo de suelo:

$$F_a = 1.00$$

$$F_v = 1.70$$

Parámetro de aceleración espectral MCE, S_{MS} y S_{M1} .

$$S_{MS} = F_a * S_s, S_{MS} = 2.13$$

$$S_{M1} = F_1 * S_1, S_{M1} = 1.17$$

El valor de amortiguamiento, se coloca el último valor de β que se obtiene del proceso iterativo indicado en el ASCE 7-22.

$$\zeta = \beta = 0.36$$

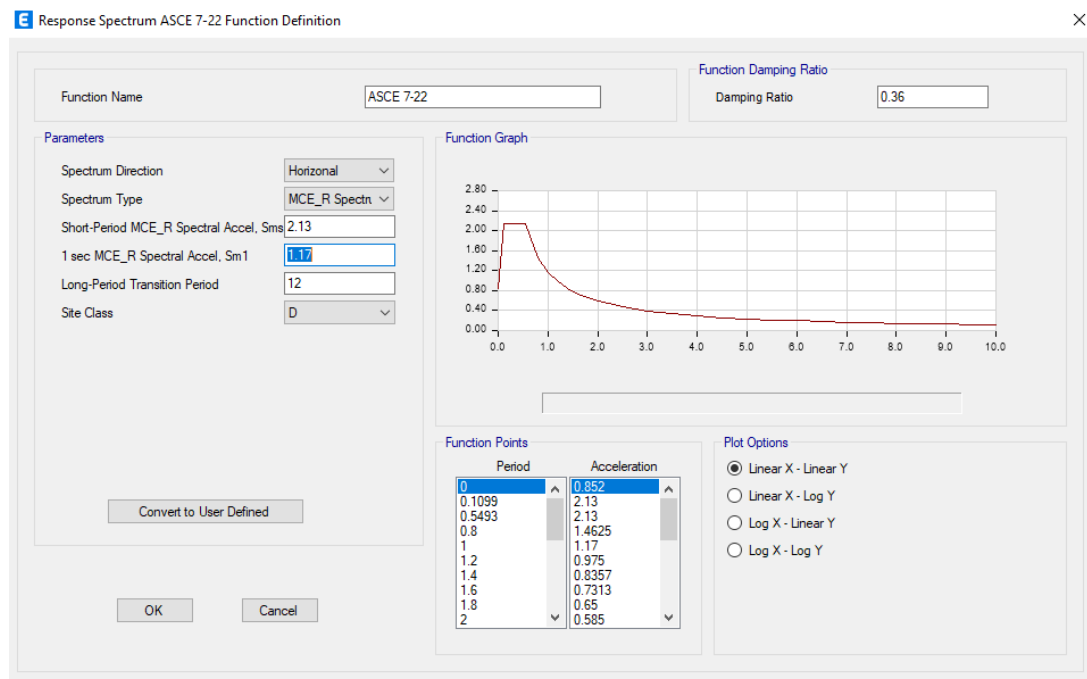


Figura 46. Espectro de respuesta ASCE 7-22

Espectro de diseño calculado con la función del software Etabs, en función de lo establecido en la norma ASCE 7-22, los valores de S_{MS} y S_{M1} , parten de los datos obtenidos en la página del Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional. (Ver figura 46)

Otro valor indispensable en esta definición, es el valor de amortiguamiento del sistema.

- Periodo de la estructura con aisladores FPT8833

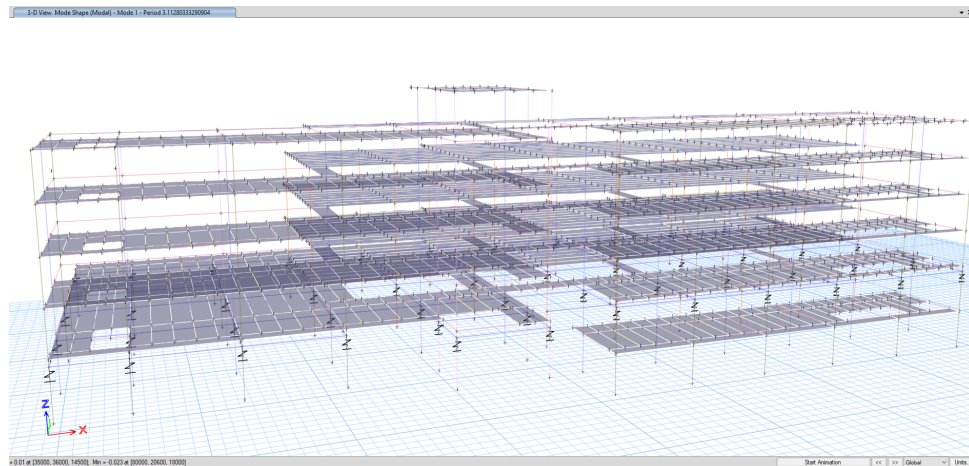


Figura 47. Periodo de la estructura, $T = 3.11$ s.

Periodo de la estructura analizada en el primer modo de vibración. El periodo de vibración de la estructura es el esperado, pues, el permitir que la base de la edificación se aislé, tiene mayor capacidad de desplazamiento. (Ver figura 47)

El periodo que sufre la estructura es de 3.11 seg, al usar aisladores sísmicos.

- Análisis de Derivas de la estructura.

La ubicación del dispositivo FTP8833, aísla la base de la estructura, por lo tanto, la deriva y desplazamiento de la misma, empezaran sobre este nivel.

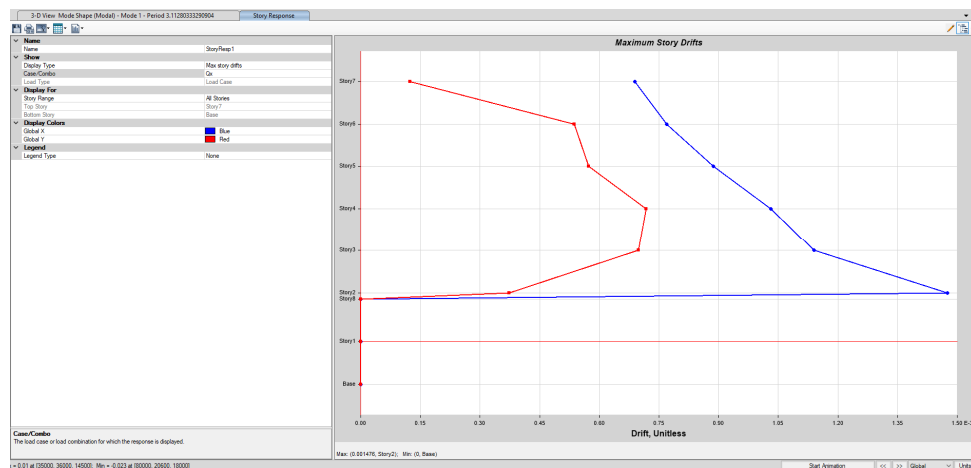


Figura 48. Deriva Qx de estructura con aisladores FPT8833.

Al analizar la deriva de la estructura con base fija y con base aislada, se denota la diferencia en la gráfica de la misma, pues se ve una variación importante una vez que se supera el nivel donde se han ubicado los aisladores de triple péndulo. (Ver figura 48)

$$\Delta_M = 0.75 * R * \Delta_E$$

$$\Delta_M = 0.75 * 5 * 0.001476 = 0.005$$

$$0.0055 < 0.01 \text{ OK}$$

- Relación demanda-capacidad de los elementos estructurales.

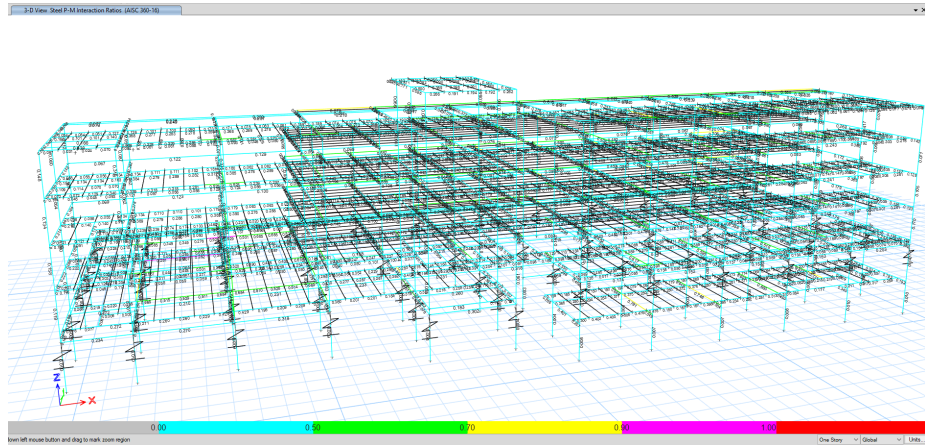


Figura 49. Relación de esfuerzos vigas y columnas

Los esfuerzos que se producen en los elementos estructurales se reducen de manera significativa al tener aislamiento en la base, esto se debe a que la influencia de la fuerza lateral del sismo no afecta directamente a la edificación. (Ver figura 49)

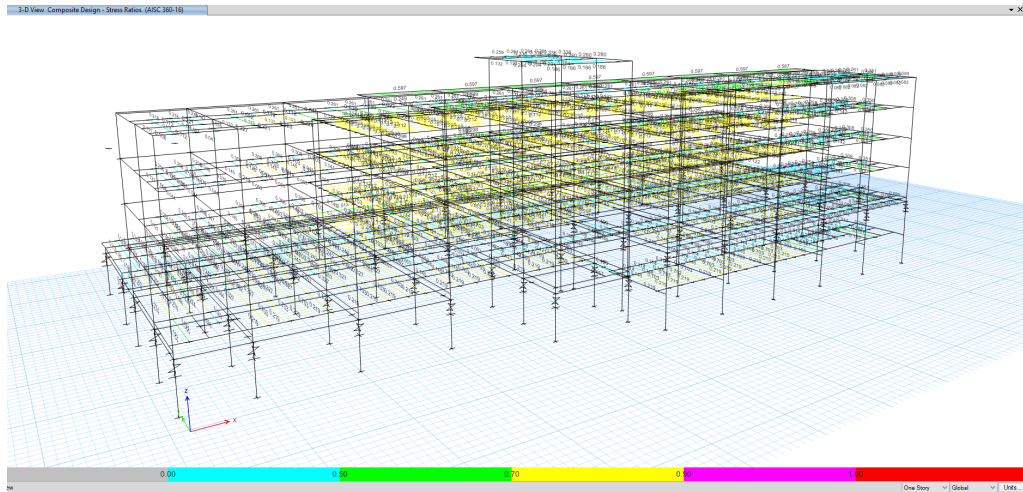


Figura 50. Relación de esfuerzos vigas compuestas

Los esfuerzos que se producen en los elementos estructurales se reducen de manera significativa al tener aislamiento en la base, esto se debe a que la influencia de la fuerza lateral del sismo no afecta directamente a la edificación. (Ver figura 50)

Todos los elementos estructurales que componen el edificio analizado tienen una relación demanda/capacidad menor a 1, por lo tanto, cumplen con lo establecido en normativa.

- Desplazamiento y cortante máximo

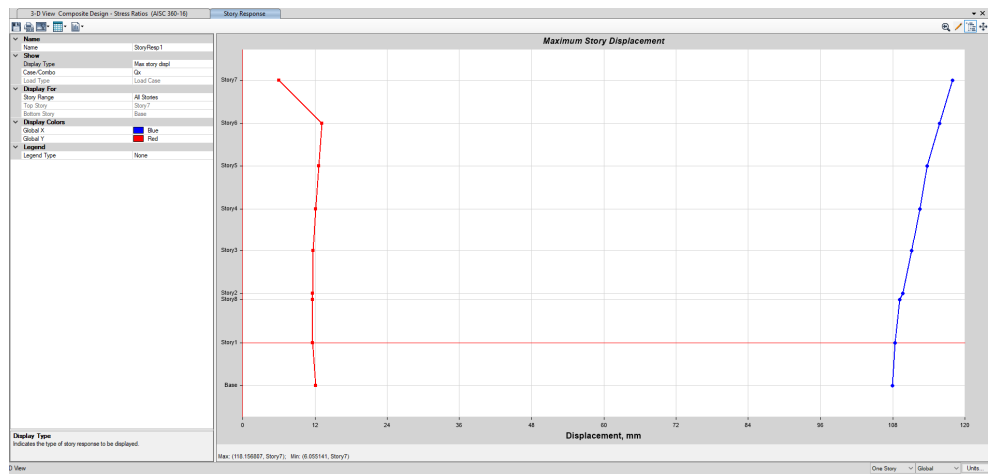


Figura 51. Desplazamiento máximo

Con el uso de aisladores de triple péndulo, se permite aumentar el desplazamiento de la estructura ya que esta se mueve de manera independiente con respecto al movimiento que se produce en el suelo por la acción sísmica. (Ver figura 51)

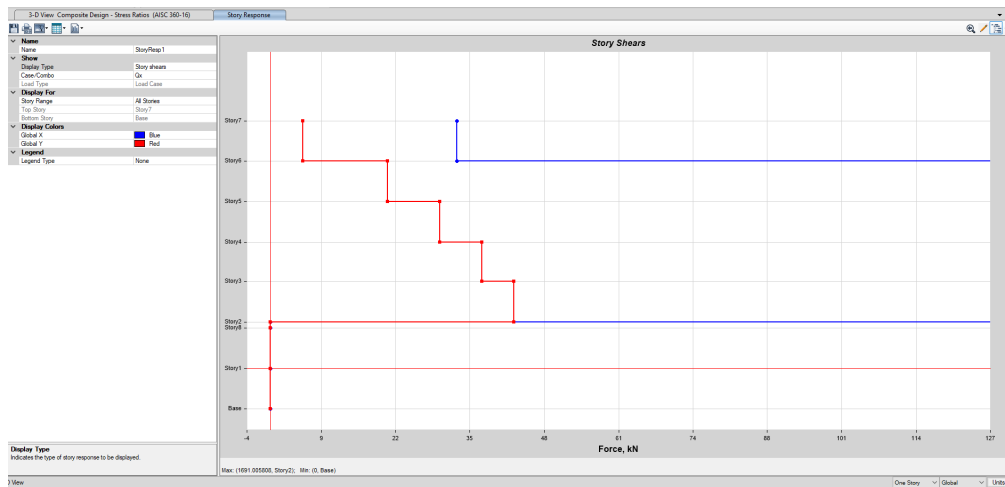


Figura 52. Cortante máximo

El cortante máximo que se produce en la base de la estructura debe ser menor al calculado en las propiedades máximas que podría resistir el aislador. (Ver figura 52)

V_s (ASCE 7-22) = 2243.83 kip – V_s (Análisis sísmico moderno) = 2703.19 kip.
 V_s (Etabs) = 1691 kip.

1691 kip < 2243.83 kip **OK**

CAPÍTULO 5

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- El uso de aisladores de triple péndulo, permiten generar un sistema de aislación en las estructuras, logrando que todos los elementos estructurales y no estructurales de la misma, tengan un daño menor y que la estructura se mantenga operativa durante y después de estar sometida a las acciones del sismo.
- Analizando el comportamiento que tiene los aisladores de triple péndulo, se puede observar que el período de vibración de la estructura, se obtiene de manera independiente de las cargas que tiene que soportar la estructura, por lo tanto, es posible realizar un prediseño de los aisladores sin necesidad de conocer las cargas a la que estará sometida la edificación analizada.
- Las propiedades que mayor injerencia tienen en el comportamiento de los aisladores son los radios de curvatura y los coeficientes de fricción, pues, los coeficientes de fricción tienen estrecha relación con la capacidad de amortiguamiento del aislador, así como los radios de curvatura permiten incrementar el periodo de la estructura. La capacidad de regresar el aislador a su posición inicial, está relacionada a la combinación de estas dos propiedades, las cuales deben ser inversamente proporcionales, a mayor radio de curvatura menor serán los coeficientes de fricción y viceversa.
- Se puede observar que, los resultados obtenidos al analizar el CENTRO DE INVESTIGACIÓN DE SALUD DE AMÉRICA LATINA DE LA PUCE, con base fija y con base aislada, presentan grandes diferencias, tanto en desplazamiento, como en derivas, así también en la relación demanda/capacidad de los elementos que conforman la edificación. El uso de aisladores de triple péndulo, garantiza un mejor comportamiento de la estructura al obtener derivas menores, al estar sometida a un sismo.
- En el modelo en el software Etabs, se logra observar una reducción del cortante basal de la estructura, esto se debe a que el periodo de la estructura, con un sistema de base fija es $T = 0.81s$, mientras que el periodo obtenido en la edificación con aisladores sísmicos es $T = 3.11 s$, adicional, el coeficiente de amortiguamiento utilizado en la estructura con aisladores es de 36%, por lo tanto, el uso de estos dispositivos, permite que se puede diseñar a las estructuras dentro del rango elástico y no sea necesario incursionar en el rango inelástico.
- Al comparar los resultados obtenidos por los dos métodos de diseño aplicados, el método de la fuerza lateral equivalente planteado por la ASCE 7-22 y el método Análisis Sísmico Moderno planteado por Salvador Ismael Gómez Chávez, la diferencia entre ellos es pequeña, esto se debe a que el método planteado por Gomez, es aproximado, pues corresponde a un pórtico equivalente y además, no

se tomó en cuenta los grados de libertad correspondientes a los giros, por ejemplo, el período de la estructura con base aislada difiere el uno del otro por 1,0s, el período obtenido en el método de fuerza lateral equivalente es $T=2.91s$ y el período con el método planteado por Salvador Ismael Gómez Chávez es $T= 3,91s$.

Lo mismo sucede en el cálculo de la fuerza de corte, en el método planteado por la ASCE 7-22, $V=2243.83$ kip y de acuerdo al método de Análisis sísmico moderno $V= 2988$ kip.

Sin embargo, este método permite tener una idea cercana a cuál será el comportamiento de la estructura sin tener que modelar la misma de manera completa en un software de diseño y cálculo.

- El uso de aisladores de triple péndulo, permite, reducir secciones de los elementos que conforman la estructura, pues estos deben soportar una fuerza de corte menor, y la relación de esfuerzos se reduce. Adicional, los aisladores permiten que la estructura sufra menores daños al estar bajo la acción del sismo MCE, lo cual permite reducir los costos de reparación o de reconstrucción de una estructura cuando debe soportar acciones sísmicas.

5.2. Recomendaciones

- Antes de iniciar con el prediseño de los aisladores de triple péndulo, es importante tener un contacto previo con los fabricantes autorizados de los mismos, pues es fundamental conocer los coeficientes de fricción reales que maneja cada dispositivo a ser utilizado.
- Los proveedores autorizados, Earthquake Protection System, disponen de un instructivo de diseño, que permite garantizar la funcionalidad continua de la estructura a pesar de encontrarse sometida a acciones sísmicas lo cual permite que la mismas se mantengan operativas, por lo tanto, se recomienda el uso de este documento técnico que se lo conoce como “Estándar para Funcionalidad Continua”.

Bibliografía

- Aguiar, R. (2012).
- Chávez, S. I. (2006). *Análisis Sísmico Moderno Ética Aplicada*. México: Trillas.
- Chopra, A. K. (2012). *Dynamics of Structures, Fourth Edition*. California: Prentice Hall.
- Choque-Bustinza. (2022). Diseño y Construcción de Hospitales que Mantendrán Funcionalidad Después de. *Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de*, 20-50.
- Constantinou, M., Whittaker, A., Kalpakidis, Y., Fenz, D., & Warn, G. (2007). Performance of Seismic Isolation Hardware under Service and Seismic Loading. *Technical Report MCEER-07-0012*.
- Daniel M. Fenz and Michael C. Constantinou. (2008). Mechanical behavior of Multi-Spherical Sliding Bearings. *MCEER*, 81-97.
- Earthquake Protection Systems. (2021). *Earthquake Protection Systems*. Obtenido de <https://www.earthquakeprotection.com/>
- Eduardo Marín, M. e. (2022). Funcionalidad Continua de Hospitales: Cumpliendo con la. 1-5.
- Fadi, D., y Constantinou, M. (2010). Evaluation of simplified methods of analysis for structures with triple friction pendulum isolators. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*.
- Fenz & Constantinou. (2006). Behaviour of the double concave Friction Pendulum Bearing. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1406.
- Fenz D. , Constantinou M. (2008). Mechanical behavior of multi-spherical sliding bearing. *Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research MCEER*.
- Ing. Diego Quizanga, Ing. José Almazán. (20 de 09 de 2021). *Estructuras de madera con aisladores sísmicos*. Obtenido de El conocimiento no se detiene: <https://vimeo.com/610292454/69f4ff8db4>
- M.C Constantinou, I. Kalpakidis, A. Filiatrault, R.A Ecker Lay. (2010). LRFD- based analysis and design procedures for bridge bearing and seismic isolators. *MCEER*, 128.
- Michael Constantinou, Roberto Aguiar , Enrique Morales , Pablo Caiza. (2016). DESEMPEÑO DE AISLADOR FPT8833/12-12/8-5 EN EL ANÁLISIS SÍSMICO DEL CENTRO DE INVESTIGACIONES Y DE POST GRADO. *Ingeniería de Estructuras*, 25.
- Pablo Leiva, Roberto Aguiar. (2017). ANÁLISIS NO LINEAL DEL AISLADOR DE TRIPLE PÉNDULO DE FRICCIÓN MEDIANTE EL MODELO TRI-LINEAL. *CIENCIA*, 7-25.
- PhD, I. A. (22 de 03 de 2021). *¿Qué aspectos importantes debemos tener en cuenta para la aplicación exitosa del Aislamiento Sísmico en Estructuras?* Obtenido de EL conocimiento no se detiene: <https://vimeo.com/527606587/705adabef0>
- PhD, I. E. (30 de 08 de 2021). *Aspectos distintivos del diseño por desplazamiento en sistemas de aislamiento sísmico y su correlación con los métodos tradicionales*.

Obtenido de El conocimiento no se detiene:
<https://vimeo.com/594987135/5e66174c0a>

Protection, E. (2021). *www.earthquakeprotection.com*.

Puchaicela, A. D. (2018). *Diseño y análisis de edificaciones con aisladores de base tipo FPT*. Cuenca.

R. Aguir, E. Morales, B. Gauyguá, M. Rodríguez. (2016). Método simplificado para el análisis sísmico de estructuras con aisladores FPS de tercera generación. *Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*.

SEAOC. (2014). *"2012 IBC SEAOC Structural/Seismic Design Manual", Volume 5: Examples for Seismically Isolated Buildings and Buildings with Supplemental Damping*. Washington DC, United States: International Building Code.

Tornello, M. E. (2012). *Protección de Estructuras con aislamiento sísmico de base*. España: Editorial Académica Española.

W. J. McVitty & M. C. Constantinou. (2015). Property modification factors for seismic isolators: Design guidance for buildings. *MCEER*.

Zayas, V., & Mahin, S. (2010). Seismic design methodology to avoid damage to structures, nonstructural components and contents. *Open Journal of Civil Engineering*, 14-31.

Zayas, V., Low, S., & Mahin, S. (1990). Simple Pendulum Technique for Achieving Seismic Isolation. *Earthquake Spectra*, 317-333.