

Estado del Arte de los Sistemas de Aislamiento Sísmico de Base Tipo Péndulo de Fricción

Harvin Adolfo Toloza Ojeda

Trabajo de Grado para Optar al título de Especialista en Estructuras

Director

Oscar Javier Begambre

Ingeniero Civil, PhD

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Especialización en Estructuras

Bucaramanga

2019

Tabla de Contenido

Introducción	13
1. Objetivos	15
1.1 Objetivo General.....	15
1.2 Objetivo Específicos.....	15
2. Alcance.....	16
3. ¿Qué son los Sistemas de Protección Sísmica?.....	16
3.1 Sistemas Activos.....	17
3.2 Sistemas Semi-Activos.....	18
3.3 Sistemas de Control Pasivos.....	20
3.3.1 Disipadores de energía.....	21
3.3.2 Aislamiento sísmico de base.....	21
3.3.2.1 Aislador de péndulo de fricción.....	22
3.4 Sistemas de Control Híbridos.....	24
4. Reseña de la Historia y Desarrollo del Aislamiento Sísmico de Base	28
4.1 Desarrollo histórico de los sistemas de aislamiento sísmico basado en fricción.....	29
4.1.1 Péndulo Viscardini (1909).....	30
4.1.2 Sistema de péndulo de fricción (1980s).....	30
4.1.3 Desarrollo de deslizadores de múltiples superficies.....	31
4.2 Colombia frente a las estadísticas internacionales.....	32
4.3 Implementación del aislamiento sísmico en Colombia.....	33
4.4 Marco legal en colombia.....	40
5. Aisladores de Base Tipo Péndulo de Fricción	41

5.1	Aisladores de primera generación- Péndulo de Fricción Simple (SFP).....	41
5.1.1	Modelo físico del aislador de péndulo de fricción simple.....	42
5.1.2	Modelo dinámico del aislador de péndulo de fricción simple.....	45
5.2	Aisladores de segunda generación- Péndulo de Fricción Cóncavo Doble (DCFP).....	48
5.2.1	Modelo físico del aislador de péndulo de fricción cóncavo doble.	49
5.2.1.1	Fase de movimiento I.	50
5.2.1.2	Fase de movimiento II.	51
5.2.1.3	Fase de movimiento III.	51
5.2.2	Modelo dinámico del aislador de péndulo de fricción cóncavo doble.....	57
5.3	Aisladores de tercera generación- Péndulo de Fricción Triple (TFP).....	60
5.3.1	Modelo físico del aislador de péndulo de fricción triple.	62
5.3.1.1	Fase de movimiento I.	65
5.3.1.2	Fase de movimiento II.	66
5.3.1.3	Fase de movimiento III.	66
5.3.2	Modelo dinámico del aislador de péndulo de fricción triple.	75
5.4	Aisladores de Péndulo de Fricción Quintuple (QTFP).....	80
5.4.1	Modelo físico del aislador de péndulo de fricción quintuple.	81
5.4.2	Modelo dinámico del aislador de péndulo de fricción quintuple.	84
5.5	Principales ventajas y desventajas.....	86
6.	Ejemplo	91
6.1	Descripción del modelo numérico.....	92
6.2	Propiedades del aislador de péndulo de fricción.....	93
6.3	Resultados numéricos.....	96
7.	Conclusiones	99
8.	Trabajos Futuros.....	102

Referencias Bibliográficas	103
----------------------------------	-----

Lista de Tablas

Tabla 1.	Comparación de sistemas de protección sísmica.....	26
Tabla 2.	Aplicación de aislamiento sísmico de base en edificaciones.	33
Tabla 3.	Trabajos de grado sobre aislamiento sísmico	34
Tabla 4.	Normativas de Diseño	40
Tabla 5.	Resumen del comportamiento del aislador DCFP.....	52
Tabla 6.	Resumen del comportamiento del aislador triple TFP	64
Tabla 7.	Configuraciones TFP	71
Tabla 8.	Parámetros del modelo en serie del triple péndulo de fricción.....	76
Tabla 9.	Resumen del comportamiento del aislador QTFP	82
Tabla 10.	Ventajas y desventajas del aislador tipo péndulo de fricción.	89
Tabla 11.	Propiedades modales del pórtico con base fija	92
Tabla 12.	Rigidez del aislador FPS.....	95

Lista de Figuras

Figura 1.	Sistema de Mecanismo de Operación Control Activo.....	17
Figura 2.	Representacion de un sistema de Control Activo.	18
Figura 3.	Representacion de un sistema de Control Semi-Activo.....	19
Figura 4.	Sistema de mecanismo de operación control Semi-Activo.....	19
Figura 5.	Sistema de Mecanismo de Operación Control Pasivo.	20
Figura 6.	Representacion de un sistema de Control Pasivo.	21
Figura 7.	Aislamiento de base.	22
Figura 8.	Esquema del aislador tipo péndulo de fricción (a) simple, (b) doble y (c) triple.....	23
Figura 9.	Esquema de la relación fuerza-desplazamiento. (a) Esquema lineal y (b) Esquema bilineal.	24
Figura 10.	Representacion de un sistema de Control Híbrido.....	25
Figura 11.	Sistema de Mecanismo de Operación Control Híbrido	25
Figura 12.	Esquema sistema de protección sísmica	26
Figura 13.	Partenón-Grecia (400 A.C) Edificio flexible, columnas deslizantes y oscilantes.....	28
Figura 14.	Péndulo de Viscardini.	30
Figura 15.	Péndulo de fricción.	31
Figura 16.	(a) Doble péndulo de fricción (b) Péndulo de fricción quintuple	32
Figura 17.	Primera edificación aislada en Colombia	34

Figura 18.	Clínica Comfandi, Cali, 2011	35
Figura 19.	Viaducto helicoidal, santa rosa de cabal-Primer puente aislado	36
Figura 20.	U Autónoma de Manizales, 2014.....	36
Figura 21.	Clínica Imbanaco, Cali 2015.....	37
Figura 22.	Puente calle 33, Manizales, 2016.....	37
Figura 23.	Universidad de Manizales, 2017	38
Figura 24.	Edificaciones aisladas sísmicamente año 2018.....	39
Figura 25.	Sección transversal del aislador de péndulo de fricción simple	42
Figura 26.	Ilustración del movimiento de la estructura soportada	43
Figura 27.	Aislador SFP. (a) Posición deformada (b) Diagrama de cuerpo libre	43
Figura 28.	Ciclo de histéresis del aislador SFP	45
Figura 29.	Modelo numérico de un aislador SFP.....	46
Figura 30.	Modelo 2-D de una estructura sísmicamente aislada con apoyos SFP	47
Figura 31.	Sección transversal del aislador de péndulo de fricción cóncavo doble (a) capacidad de desplazamiento igual y (b) capacidad de desplazamiento diferente	48
Figura 32.	Diagramas de cuerpo libre del aislador DCFP.....	53
Figura 33.	Curva de histéresis (a) bilineal y (b) trilineal.....	55
Figura 34.	Modelo matemático de un aislador DCFP.....	57
Figura 35.	Estructura 3D de un piso sobre un aislador DCFP	59
Figura 36.	Sección transversal del aislador de péndulo de fricción triple.....	61
Figura 37.	Ángulos de rotación para las cuatro superficies	63
Figura 38.	Diagramas de cuerpo libre del aislador TFP	67
Figura 39.	Diagramas de cuerpo libre del TFP	69

Figura 40.	Relación monotónica fuerza-desplazamiento del aislador FPT	70
Figura 41.	Relación fuerza-desplazamiento del aislador TFP para la configuración A.....	72
Figura 42.	Relación fuerza-desplazamiento del aislador TFP para la configuración B73	
Figura 43.	Comportamiento esquemático fuerza-desplazamiento del aislador TFP	74
Figura 44.	Modelo matemático de un aislador TFP	76
Figura 45.	Etapas de levantamiento del aislador TFP	78
Figura 46.	Sección transversal del péndulo de fricción quintuple	80
Figura 47.	Fases de movimiento del QTFP	81
Figura 48.	Modelo en serie del aislador QTFP	84
Figura 49.	Modelo en paralelo del aislador QTFP	85
Figura 50.	Registro sísmico de Talca 2010	91
Figura 51.	Geometría del pórtico (a) base fija, (b) base aislada.....	93
Figura 52.	Propiedades elemento tipo link.....	94
Figura 53.	Reacciones en la base carga muerta-[ton].....	95
Figura 54.	Comportamiento cíclico no lineal del FPS	96
Figura 55.	Forma modal – Modo 1 con (a) base fija y (b) base aislada	97
Figura 56.	Historia de desplazamiento en la base	97
Figura 57.	Historia de cortante basal normalizado.....	98
Figura 58.	Historia de derivas de piso.....	98

RESUMEN

TÍTULO: ESTADO DEL ARTE DE LOS SISTEMAS DE AISLAMIENTO SÍSMICO DE BASE TIPO PÉNDULO DE FRICCIÓN*

AUTOR: HARVIN ADOLFO TOLOZA OJEDA**

PALABRAS CLAVE: aislamiento de base, péndulo de fricción

DESCRIPCIÓN:

Los sistemas de aislamiento sísmico tienen como objetivo limitar la energía que el sismo transfiere a la estructura, separando la estructura de los movimientos del suelo mediante una interfaz flexible que modifica las propiedades dinámicas de la estructura. En este documento se describe el estado del desarrollo tecnológico de los sistemas de aislamiento sísmico de base tipo péndulo de fricción, como herramienta de protección sísmica de estructuras. Se presenta su clasificación en función de los péndulos de fricción efectivos como: péndulo simple o de primera generación, péndulo doble o de segunda generación, péndulo triple o de tercera generación y péndulo quíntuple o de cuarta generación. Además, se describen las características mecánicas y la formulación física de cada tipo de péndulo. Los parámetros analizados para su descripción son: capacidad de desplazamiento, fases de movimiento, relaciones fuerza-desplazamiento y ciclo histéretico y comportamiento ante diferentes niveles de amenaza sísmica, a partir de los cuales se identifican sus principales ventajas y desventajas. Adicionalmente, se describe el estado de la implementación de estos sistemas en Colombia y se presenta el marco legal existente. Por último, se ha realizado un modelo numérico computacional implementado en el software SAP 2000 y se ha comparado la respuesta del modelo con base fija y con base aislada en términos de desplazamiento del aislador, cortante basal normalizado y derivas de piso, en donde se comprueba que el sistema de aislamiento de péndulo de fricción mejora el desempeño de la estructura.

* Monografía

** Facultad de Ingeniería Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Oscar Javier Begambre, Ph.D.

ABSTRACT

TITLE: STATE OF THE ART OF FRICTION PENDULUM BEARING SEISMIC BASE ISOLATION SYSTEM*

AUTHOR: HARVIN ADOLFO TOLOZA OJEDA**

KEY WORDS: base isolation, friction pendulum system

DESCRIPTION:

Seismic isolation systems aim to limit the energy that seismic movements transfer to a structure, by separating it from the movements of the ground through a flexible interface that modifies the dynamic properties of the structure. This document describes the state of technological development of friction pendulum bearing seismic base isolation systems, as a structural seismic protection tool. Its classification according to the effective friction pendulums is presented, such as: simple or first-generation pendulum, double or second-generation pendulum, triple or third-generation pendulum and quintuple or fourth-generation pendulum. In addition, the mechanical characteristics and the physical formulation of each type are described. The parameters analyzed for their description are: displacement capacity, sliding regimes, force-displacement relationships and hysteretic cycle and behavior at different levels of seismic hazard, from which their main advantages and disadvantages are identified. Besides, the state of the implementation of these systems in Colombia is described and the existing legal framework is presented. Finally, a computational numerical model implemented in SAP 2000 has been carried out and the response of a fixed base model and an isolated base model has been compared in terms of bearing displacement, normalized base shear and floor drifts, where it is verified that friction pendulum bearing base isolation system improves structural performance.

* Monograph

** Facultad de Ingeniería Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Oscar Javier Begambre, Ph.D

Introducción

El diseño estructural convencional se fundamenta en el método de resistencia última, el cual se basa en proveer a una estructura la resistencia y ductilidad suficiente para soportar una demanda sísmica sin colapsar. Esta demanda es determinada con base en registros históricos de las fuentes sismogénicas representativas de un lugar determinado. Por lo tanto, un diseño sismoresistente garantiza que para un determinado nivel de demanda sísmica no se sobrepase la capacidad de ductilidad del material y elementos que componen la estructura.

Según la normativa nacional vigente de construcción sismoresistente NSR-10, las edificaciones son diseñadas para que sean capaces de resistir, además de las fuerzas que le impone su uso: i) temblores de poca intensidad sin daños; ii) temblores de intensidad moderada sin daño estructural, pero posiblemente con algún daño en elementos no estructurales y iii) temblores fuertes con daños a elementos estructurales y no estructurales, pero sin colapso, salvaguardando la vida de sus ocupantes (Comisión asesora permanente para el régimen de construcciones sismo resistente, 2010). Esta filosofía de diseño implica que la energía de un sismo, transmitida a la estructura, se disipará a través del daño de sus elementos, daño que en casos extremos puede limitar o imposibilitar la operación de una estructura después de la ocurrencia de un evento sísmico.

La filosofía de diseño descrita anteriormente resulta insuficiente para el caso de edificaciones clasificadas como indispensables y de atención a la comunidad, tales como hospitales, centrales de operación y control de líneas vitales, entre otros, ya que estas estructuras deben funcionar durante y después de un sismo fuerte. Para que la operación de la estructura no se vea afectada se hace necesario proteger incluso sus elementos no estructurales. En Colombia se han presentado

casos que sustentan la afirmación anterior, en donde, aunque no se ha producido colapso ante movimientos sísmicos, si se han presentado daños en elementos no estructurales, entorpeciendo parcialmente la operación de la edificación y causando pérdidas económicas importantes (El Tiempo, 2004; El Colombiano, 2012; Herald, 2016). Para evitar daños en elementos no estructurales debidos a sismos de intensidad moderada y severa, es necesario proporcionar a estos elementos un desempeño superior al requerido en las normas. Este desempeño puede alcanzarse implementando sistemas de protección sísmica de estructuras, ya sea de disipación de energía o de aislamiento sísmico (Corporación de Desarrollo Tecnológico & de la Construcción, 2012) y (Piscal & López, 2016).

Aunque en los últimos años en Colombia se han realizado avances importantes en el estudio de los sistemas de protección sísmica, la implementación de esta tecnología ha sido escasa, en gran medida debido a que no se cuenta con una normativa propia que considere aspectos técnicos y sísmicos locales, aunque la norma actual vigente contempla el empleo de dispositivos de aislamiento y disipación (sección A.3-8 y A.3-9), estas secciones se limitan a redireccionar a normas americanas (FEMA 1050, 2015; ASCE/SEI 7-16, 2016).

Pese a esta limitación, los sistemas de aislamiento sísmico siguen siendo materia de estudio, puesto que en términos generales limitan la energía que el sismo transfiere a la estructura, previniendo el daño de los elementos. Por esta razón, este documento pretende describir el estado del desarrollo tecnológico de los sistemas de aislamiento sísmico de base tipo péndulo de fricción de primera, segunda y tercera generación.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Describir el estado del desarrollo tecnológico de los sistemas de aislamiento sísmico de base tipo péndulo de fricción de primera, segunda, tercera y cuarta generación en función de parámetros como rigidez, coeficiente de fricción, capacidad de desplazamiento y relaciones fuerza-desplazamiento.

1.2 Objetivo Específicos

Describir las características mecánicas del sistema de aislamiento sísmico de base tipo péndulo de fricción.

Presentar la formulación física que rige el comportamiento mecánico de los aisladores tipo péndulo de fricción.

Identificar las ventajas y desventajas de los sistemas de aislamiento sísmico de base tipo péndulo de fricción.

2. Alcance

Los parámetros tenidos en cuenta para la descripción de los aisladores de base tipo péndulo de fricción son: rigidez, coeficiente de fricción, capacidad de desplazamiento, relaciones fuerza desplazamiento (equilibrio estático) y equilibrio dinámico. Adicionalmente solo se estudian aplicaciones para edificaciones de tipo residencial u hospitales. Se omiten en la revisión aspectos económicos, metodologías de modelamiento numérico e interacción suelo-aislador-estructura.

3. ¿Qué son los Sistemas de Protección Sísmica?

Los sistemas de protección sísmica o de control estructural tienen como objetivo disminuir la vibración de una estructura producida por fuerzas externas, ya sean sismos o viento, modificando sus propiedades de rigidez y amortiguamiento, lo cual tiene como consecuencia mejorar la respuesta de la estructura ante un evento sísmico. Estos sistemas se basan en tecnologías o dispositivos que pueden tomar dos enfoques: disminuir la energía que el sismo impone en la estructura, o absorberla en elementos específicos encargados de disipar energía a través de deformaciones (Asai & Spencer, 2015). De acuerdo a su modo de operación se clasifican en cuatro categorías: sistemas de control pasivos, activos, semi activos e híbridos. En las siguientes secciones se hace una descripción de cada uno de ellos.

3.1 Sistemas Activos

Los sistemas de control activo son dispositivos que generan fuerzas sobre una estructura para modificar su respuesta dinámica. Su funcionamiento, el cual se ilustra en la Figura 1, consiste en generar una fuerza sobre la estructura a partir de un actuador. El actuador se activa en función de la respuesta medida a través de sensores y modifica o controla su comportamiento estructural, contrarestando los movimientos de la estructura. (Soong & Spencer, 2000). Basicamente los dispositivos imparten una fuerza o movimiento a la estructura en dirección contraria a la vibración (Gomez, Marulanda, & Thomson, 2008).

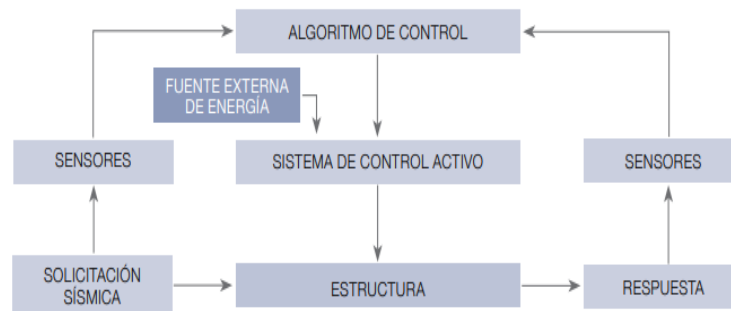


Figura 1. Sistema de Mecanismo de Operación Control Activo.

Tomado de *Protección Sísmica de Estructuras*, por Corporación de Desarrollo Tecnológico & de la Construcción, 2012, Santiago de Chile: Trama Impresores S.A. Recuperado de www.cdt.cl

El concepto de los sistemas activos es ilustrado a partir del modelo de dos masas mostrado en la Figura 2. Aquí la estructura es idealizada como un sistema de un grado de libertad (SDOF, por sus siglas en inglés) con propiedades de masa, rigidez y amortiguamiento (m_1 , k_1 y c_1) sometida a una excitación $f(t)$ que genera un desplazamiento x_1 . Un sensor “u” mide la respuesta de la estructura y activa el actuador representado por la masa m_2 , generando un desplazamiento x_2 ; el

movimiento del actuador genera una fuerza sobre la estructura, contraria a la dirección del movimiento que amortigua la respuesta de la estructura.

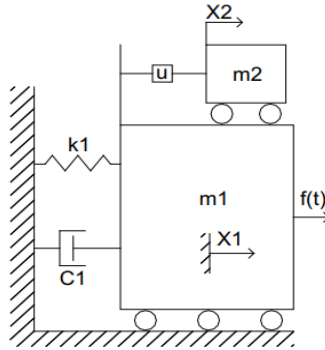


Figura 2. Representación de un sistema de Control Activo.

Tomado de *Teoría del Aislamiento Sísmico para Edificaciones*, por Bonilla Sosa, 2012. Tesis para obtener el título de Ingeniero Civil: Universidad Nacional Autónoma de México.

3.2 Sistemas Semi-Activos

Los sistemas semi activos son llamados “amortiguadores inteligentes o controlables” y se componen de un sistema de control pasivo, como se ilustra en la Figura 3, cuyo funcionamiento se regula con base en mediciones de la respuesta de la estructura. Entre estos sistemas se pueden encontrar dispositivos controlables de amortiguadores de masa sintonizada o TMD por sus siglas en inglés (*Tuned Mass Dampers*), de líquido sintonizado o TLD (*Tuned Liquid Dampers*), friccionantes, absorbentes de vibración, entre otros (Saaed, Nikolakopoulos, Jonasson, & Hedlund, 2015), amortiguadores magneto-reológicos o MRD (*Magneto-Rheological Damper*) y electro-reológicos o ERD (*Electro-Rheological Damper*) (Thenozhi & Yu, 2013).

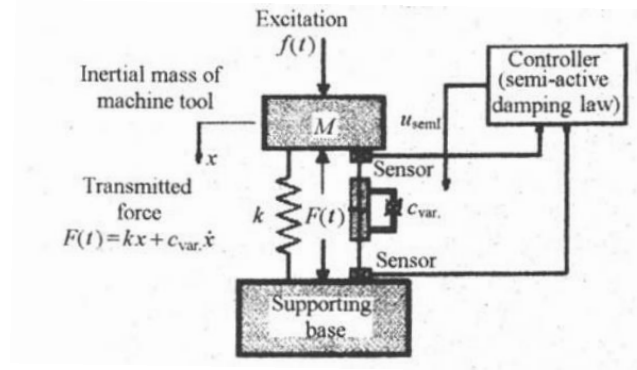


Figura 3. Representación de un sistema de Control Semi-Activo.

Tomado de *Passive Active and Semi-Active Control Systems in Civil Engineering* por Luca, Chira, & Rosca, 2005, Buletinul Institutului Politehnic Din Iasi.

El sistema semi-activo actúa modificando en tiempo real las propiedades mecánicas de los dispositivos de disipación, como se indica en la Figura 4 (Corporación de Desarrollo Tecnológico & de la Construcción, 2012).

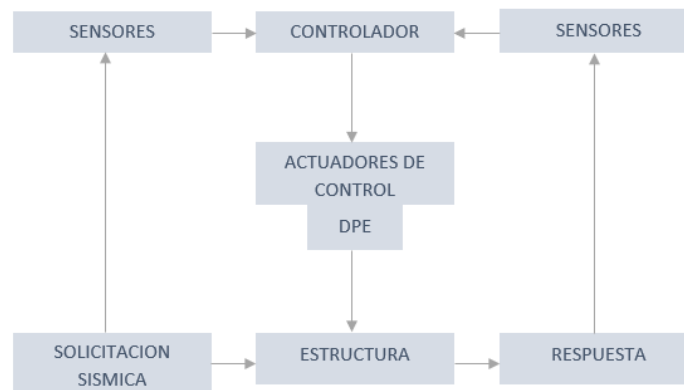


Figura 4. Sistema de mecanismo de operación control Semi-Activo.

Adaptado de *Sistemas Modernos de Protección Sísmica en Edificaciones* por Laverde, 2017.

Universidad Industrial de Santander.

3.3 Sistemas de Control Pasivos

El sistema de control pasivo consiste en uno o mas dispositivos, conectados a una estructura y diseñados para modificar su amortiguamiento sin necesidad de una fuente de potencia externa (Luca et al., 2005), su mecanismo de operación se ilustra en la Figura 5. Los dispositivos de control pasivo producen fuerzas inerciales en respuesta a la acción sísmica (Bonilla Sosa, 2012), incluyen dispositivos de aislamiento de base y disipación de energía y están orientados a disminuir las vibraciones transmitidas a la estructura.

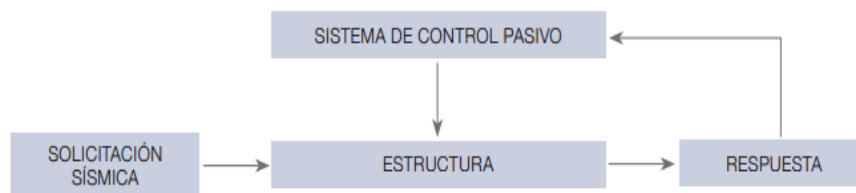


Figura 5. Sistema de Mecanismo de Operación Control Pasivo.

Tomado de *Protección Sísmica de Estructuras*, por Corporación de Desarrollo Tecnológico & de la Construcción, 2012, Santiago de Chile: Trama Impresores S.A. Recuperado de www.cdt.cl

El concepto de los sistemas pasivos es ilustrado a partir del modelo de dos masas mostrado en la Figura 6. La estructura se idealiza como un sistema de un grado de libertad al igual que el dispositivo de control, el propósito del dispositivo de control es limitar el movimiento de la estructura cuando esta se encuentra sujeta a una excitación $f(t)$, por lo cual se diseña especificando una masa m_2 , rigidez k_2 y coeficiente de amortiguamiento c_2 . Una clasificación de estos dispositivos se aborda a continuación:

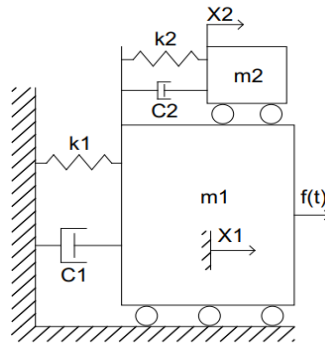


Figura 6. Representación de un sistema de Control Pasivo.

Tomado de *Teoría del Aislamiento Sísmico para Edificaciones*, por Bonilla Sosa, 2012. Tesis para obtener el título de Ingeniero Civil: Universidad Nacional Autónoma de México.

3.3.1 Disipadores de energía. Aunque los dispositivos disipadores de energía no son el objeto de la presente monografía, aquí se describen y se presentan algunos tipos. Estos dispositivos tienen como función absorber parte de la energía transmitida a la estructura. Se clasifican en: histeréticos, visco-elásticos (Santos, 2011), dispositivos de recentrado, amortiguadores de transformación de fase y de vibración dinámica (Saaed et al., 2015).

3.3.2 Aislamiento sísmico de base. Debe Estos sistemas operan mediante el principio de separar la superestructura de los movimientos del suelo mediante una interfaz flexible en dirección horizontal y muy rígida en dirección vertical (Ver Figura 7). Como consecuencia de la flexibilidad horizontal del sistema de aislamiento, la estructura aislada tendrá un nuevo modo de vibración sin desplazamientos relativos significativos entre pisos adyacentes. Esta condición alargará los periodos fundamentales de la estructura aislada, que pueden llegar a ser hasta tres veces mayores a los periodos de la estructura sin sistema de aislamiento (Saaed et al., 2015; Corporación de Desarrollo Tecnológico & de la Construcción, 2012).

Los dispositivos de aislamiento sísmico son eficientes para estructuras con periodos fundamentales cortos, como lo son estructuras de altura mediana a baja. Como estos dispositivos aumentan los periodos fundamentales, no son adecuados para estructuras con periodos largos (Marko, 2006). Los sistemas de aislamiento se clasifican según su modo de operación en dos grupos: aisladores elastoméricos y aisladores deslizantes. El presente documento se concentra fundamentalmente en los sistemas de control pasivos tipo péndulo de fricción, descritos a continuación:

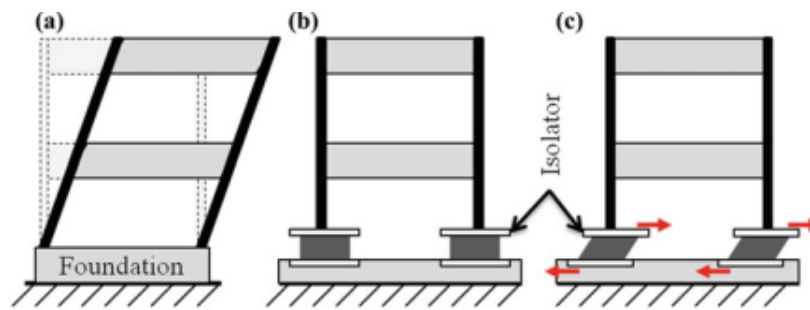


Figura 7. Aislamiento de base.

Tomado de *Active Structural Control with Stable Fuzzy PID Techniques* por Yu & Thenozhi, 2016.

Springer International Publishing. Recuperado de: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-28025-7>.

3.3.2.1 Aislador de péndulo de fricción: El sistema FPS por sus siglas en inglés (Frictional Pendulum System) se ubica dentro de la categoría de aisladores deslizantes; consiste en un deslizador articulado sobre una superficie cóncava de acero inoxidable como se muestra en la Figura 8 (Aguilar, Almazan, Dechent, & Suarez, 2008).

La geometría esférica de su superficie y la fuerza de restitución que proporciona el peso de la superestructura provee a los FPS una capacidad autocentrante, es decir, después de un movimiento sísmico la estructura regresa a su posición inicial (Corporación de Desarrollo Tecnológico & de la

Construcción, 2012); este movimiento relativo a lo largo de las superficies cóncavas alarga el periodo natural de la estructura, a su vez, la energía sísmica es disipada por medio de la fricción entre el deslizador y la superficie (Gandelli, 2017).

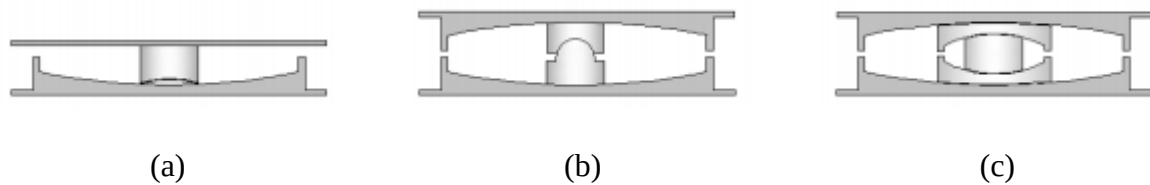


Figura 8. Esquema del aislador tipo péndulo de fricción (a) simple, (b) doble y (c) triple

Tomado de Diseño Estructural De Un Puente Carretero Con Aisladores Sismicos Tipo Péndulo Friccional, Ubicado En La Provincia De San Juan, Argentina por Bustos, Uliarte, Morandi, & Uliarte, 2014. Jornadas Argentinas de Ingeniería Estructural, Buenos Aires.

Existen principalmente dos modelos para el diseño de los sistemas de aislamiento sísmico: un primer modelo donde el sistema se representa por medio de un arreglo en paralelo de un resorte lineal y un amortiguador viscoso (Ver Figura 9(a)), el cual resulta en una representación lineal de la relación fuerza-desplazamiento del aislador; y un segundo modelo donde esta relación se representa bilinealmente, a partir de un arreglo en paralelo de dos resortes, mas un amortiguador tipo Coulomb conectado en serie con uno de los resortes (Ver Figura 9(b)). El comportamiento histéretico del aislador puede ser representado a partir de un diagrama fuerza-desplazamiento, cuyas características dependen del modelo que se utilice. Por ejemplo, en el modelo lineal, la pendiente de un ciclo de carga-descarga (línea punteada) representa la rigidez equivalente del sistema de aislamiento, mientras que en el modelo bilineal, el ciclo se caracteriza por dos pendientes que representan la rigidez inicial y de post-fluencia, respectivamente, y corresponden a la deformación elástica y plástica del aislador (Skinner, Robinson, & McVerry, 1993).

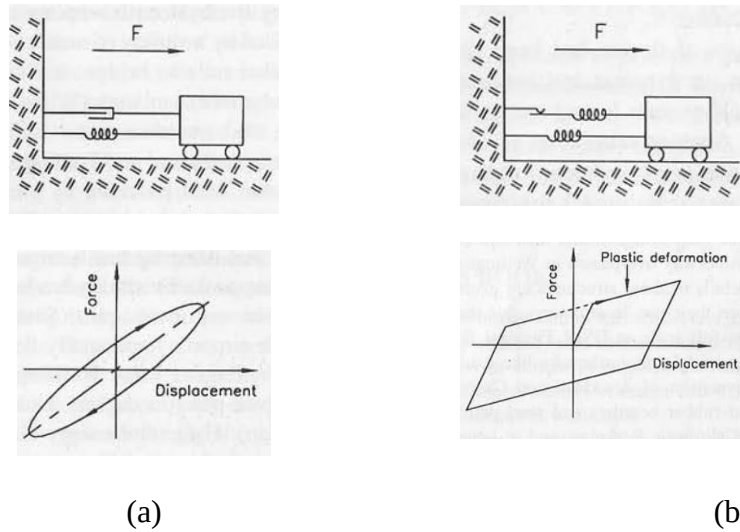


Figura 9. Esquema de la relación fuerza-desplazamiento. (a) Esquema lineal y (b) Esquema bilineal.

Tomado de *An introduction to seismic isolation* por Skinner, Robinson, & McVerry, 1993, England: John Wiley & Sons. Recuperado de: [https://doi.org/10.1016/0267-7261\(93\)90010-O](https://doi.org/10.1016/0267-7261(93)90010-O)

3.4 Sistemas de Control Híbridos

Un sistema de control híbrido consta de una combinación de dispositivos activos y dispositivos pasivos, como se muestra en la Figura 10, por ejemplo, una estructura aislada en la base con actuadores controlados activamente (Gomez et al., 2008). Esta combinación permite aprovechar las ventajas que los dos sistemas aportan al comportamiento de la estructura, es decir, combina la robustez de los dispositivos pasivos y el alto rendimiento de los dispositivos activos (Thenozhi & Yu, 2013). Los sistemas híbridos se clasifican en dos tipos: aisladores de base híbridos o HBI (*Hybrid Base Isolation*) y amortiguadores de masa híbridos o HMD (*Hybrid Mass Damper*), su mecanismo de operación se describe en la Figura 11.

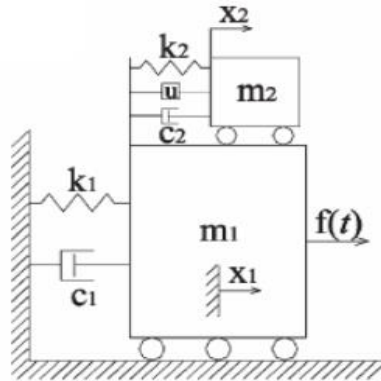


Figura 10. Representación de un sistema de Control Híbrido.

Tomado de *Control systems for dynamic loading protection of civil structures* por Gomez et al., 2008, Colombia: Dyna.

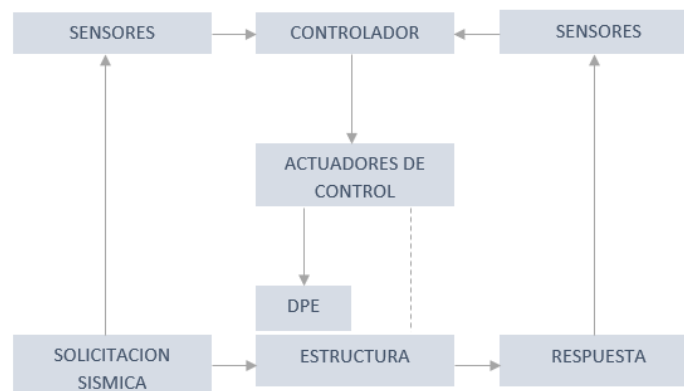


Figura 11. Sistema de Mecanismo de Operación Control Híbrido

Tomado de *Sistemas Modernos de Protección Sísmica en Edificaciones* por Laverde, 2017. Universidad Industrial de Santander.

Los sistemas de protección sísmica se pueden resumir en el esquema presentado en la Figura 12.

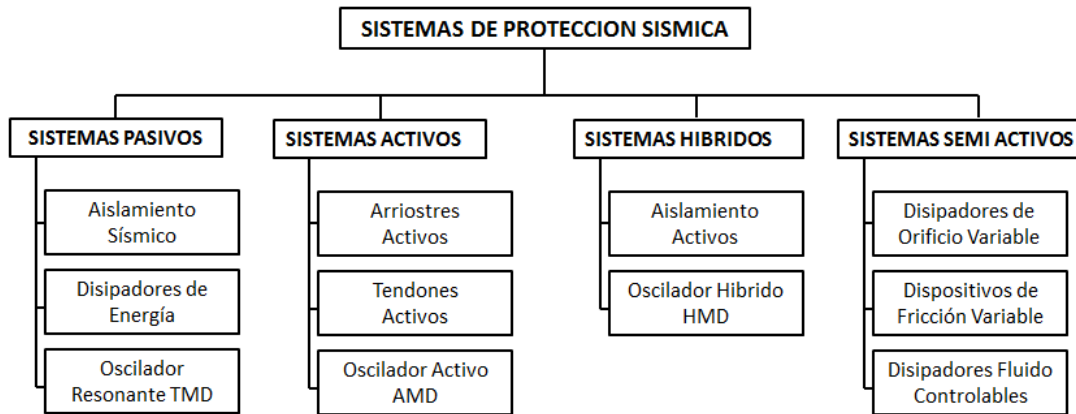


Figura 12. Esquema sistema de protección sísmica

Tomado de *Sistemas Modernos de Protección Sísmica en Edificaciones* por Laverde, 2017.

Universidad Industrial de Santander.

Finalmente, en la Tabla 1 se describen sus principales ventajas y desventajas.

Tabla 1.

Comparación de sistemas de protección sísmica

Tecnología	Dispositivo de control	Ventajas	Desventajas
Activo	* Sistema de control de bucle abierto * Control de bucle cerrado * Control de bucle abierto-cerrado	* Mayor efectividad en el control de la respuesta en comparación con los sistemas pasivos * Relativa insensibilidad a las condiciones del sitio y al movimiento del suelo * Aplicabilidad a diferentes situaciones de amenaza (viento o sismo)	* Desfase entre el tiempo de detección de la respuesta y la aplicación de la fuerza de control, lo que puede causar inestabilidad * Imposibilidad de medir todos los puntos de interés * Relación costo-beneficio y requisitos de hardware
Semi-activo	* Amortiguadores de orificio (líquido) - Dispositivos de rigidez variable * Dispositivos de fricción controlada	* Se adaptan como un sistema de control activo sin requerir una mayor fuente de potencia.	* No pueden lograr el rendimiento que tienen los sistemas completamente activos

Tabla 1. (Continuación).

Pasivo	Aislamiento de base	Apoyos elastoméricos	* Aceleraciones bajas en la estructura * Bajo costo	* Largos desplazamientos y bajo amortiguamiento * No tiene mecanismo de fuerza restitutiva * Influencia en el efecto P-Δ
		Sistema de péndulo de fricción	* Amortiguamiento moderado a alto * Reduce la torsión estructural	* Se puede presentar levantamiento del soporte * Alto costo * Periodo de vibración fijo
	Aislamiento de base	Rodillos	* Aceleraciones bajas en la estructura * Buena flexibilidad horizontal	* No tiene amortiguamiento * No tiene mecanismo recentrante * No aplica para masa grande * Aplana la superficie de contacto
	Pasivo	Disipación de energía	Amortiguador de fluido viscoso	* Se activa a desplazamientos bajos * Fuerza restitutiva mínima * Las propiedades son independientes de la temperatura y de las frecuencias altas
Amortiguador sólido viscoelástico			* Se activa a desplazamientos bajos * Provee fuerza restitutiva	* Capacidad de deformación limitada * Las propiedades son dependientes de la temperatura y la frecuencia * Posible desprendimiento y rotura del material
Amortiguador metálico			* Comportamiento histerético estable * Confiabilidad a largo plazo * Insensible a la temperatura ambiente	* Si el dispositivo se daña después de un sismo requiere reemplazo * Comportamiento no lineal, por lo tanto requiere análisis no lineal
Amortiguador de fricción			* Gran energía disipada durante cada ciclo * Insensible a la temperatura ambiente	* Las condiciones de la superficie deslizante pueden cambiar a lo largo del tiempo * Fuerte comportamiento no lineal * No tiene mecanismo recentrante

Tabla 1. (Continuación).

Híbrido	Aislamiento de base pasivo	+	* Reduce las derivas de entrepiso y el desplazamiento absoluto en la base	* Limitados en su capacidad de adaptarse a los cambios en la demanda para la reducción de la respuesta estructural.
	aislamiento de base activo		* Relación costo-beneficio	* Se requiere una fuente externa de potencia

Nota: Adaptado de: Braz-César & Carneiro De Barros, 2013; Datta, 2003; Forrai, Hashimoto,

Funato, & Kamiyama, 2002; Soong & Spencer, 2000

4. Reseña de la Historia y Desarrollo del Aislamiento Sísmico de Base

A lo largo de la historia del hombre siempre ha existido la amenaza de los fenómenos naturales, entre los que se destacan los sismos. En consecuencia, ha surgido la necesidad de proteger las construcciones emblemáticas de cada época, ejemplo de ello son las estructuras que aún continúan en pie (Figura 13) (Williams & Condoy, 2013).

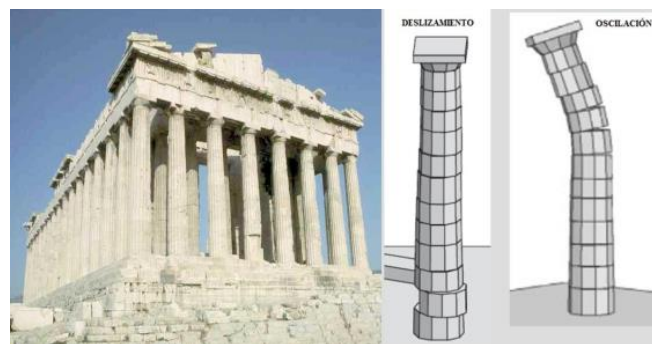


Figura 13. Partenón-Grecia (400 A.C) Edificio flexible, columnas deslizantes y oscilantes.

Tomado de *Guía de diseño y fabricación de un aislador elastomérico para una edificación de cuatro pisos*. por Williams & Condoy, 2013, Ecuador. Universidad de las Fuerzas Armadas.

En respuesta a la necesidad de proteger las estructuras de los sismos, a partir de finales del siglo XIX se comenzaron a generar estudios en Europa, Estados Unidos y Asia que dieron como resultado diferentes técnicas de protección sísmica como la disipación de energía y el aislamiento sísmico (Williams & Condoy, 2013). A mediados de los años 80, Japón incentivó estudios y la implementación de técnicas de control de respuesta sísmica generando un mayor desarrollo y un acercamiento de estas técnicas al diseño estructural (Oviedo & Duque, 2009).

Actualmente, los países que mayor aporte han realizado al estudio de las técnicas de control sísmico son Japón, Estados Unidos, Italia, Nueva Zelanda y China. Gracias a estos estudios se ha logrado que países como México, Chile, Perú (Chuman Bermeo & Valladares Ojeda, 2017), Ecuador (Chuman Bermeo & Valladares Ojeda, 2017), Argentina y Colombia se estén vinculando a realizar estudios teóricos y prácticos de implementación de las técnicas de control sísmico (Oviedo & Duque, 2009).

4.1 Desarrollo histórico de los sistemas de aislamiento sísmico basado en fricción

La técnica de aislamiento de base se ha convertido en una de las estrategias más usadas para proteger la infraestructura de la acción de fuerzas sísmicas (Calvi & Calvi, 2018). Según Piscal & López (2016), el aislamiento sísmico de base consiste en realizar la separación de la estructura de la fundación por medio de la implementación de dispositivos altamente flexibles en la dirección horizontal y con alta rigidez en el sentido vertical con el fin de modificar el periodo de la estructura (aumentándolo) y el amortiguamiento sin modificar la masa de la estructura y como resultado reducir la fuerza sísmica de diseño.

Esta monografía se centra en el desarrollo histórico y tecnológico de los aisladores de base tipo péndulo de fricción según lo reportado en la literatura especializada.

4.1.1 Péndulo Viscardini (1909). DebenMario Viscardini patentó este dispositivo después del sismo de Messina en 1909 bajo el concepto de que la seguridad de una estructura se puede dar permitiendo que esta se mueva libremente del suelo. El dispositivo consistía en una esfera que podía girar libremente dentro de dos cajas curvadas las cuales aseguraban una posición de equilibrio, tenía una capacidad alta de desplazamiento, así como de resistencia a cargas verticales pero una baja resistencia a fuerzas cortantes, por lo cual no pudo ser utilizado para edificios con demandas de disipación especial (Barucci, 1990).

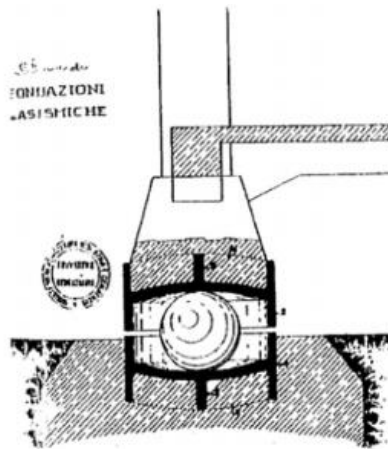


Figura 14. Péndulo de Viscardini.

Tomado de *La casa antisísmica* por Barucci, 1990, Gangemi, Tome.

4.1.2 Sistema de péndulo de fricción (1980s). Víctor Zayas fue el encargado de realizar la revisión de la patente de este dispositivo publicada en el año 1987 (Zayas, Low, & Mahin, 1990). El péndulo de fricción se compone de un deslizador articulado que se mueve sobre una superficie cóncava de radio R .

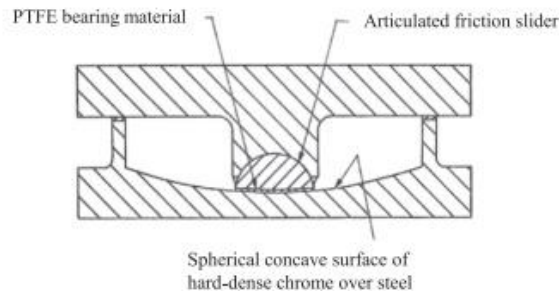


Figura 15. Péndulo de fricción.

Tomado de *The FPS earthquake resisting system: Experimental report (ubc/eerc-87/01)* por V Zayas, Low, & Mahin S, 1987. University of California, Berkeley.

El péndulo de fricción puede soportar grandes demandas de desplazamiento producidos por eventos sísmicos por lo que ha sido utilizado ampliamente en puentes. Los problemas surgidos en este dispositivo involucraron cambios en el coeficiente de fricción debido a la temperatura, la capacidad a carga axial, delaminación en el material y la oscilación del dispositivo (Warn & Ryan, 2012).

4.1.3 Desarrollo de deslizadores de múltiples superficies. Debido a que el sistema de péndulo de fricción, FP (por sus siglas en inglés) presenta algunas limitaciones, pero aun así es utilizado en edificios y puentes, se ha llegado a una serie de dispositivos que pueden mejorar el rendimiento de los FP tradicionales, algunos de ellos incluyen aisladores de péndulos de frecuencia variable y múltiples superficies deslizantes.

El beneficio principal de los deslizadores de múltiples superficies es que permiten un comportamiento adaptativo, donde las propiedades de rigidez y amortiguamiento del deslizador pueden cambiar en función de una amplitud de desplazamiento determinada (Fenz & Constantinou, 2008e). En los últimos treinta años, el sistema de aislamiento sísmico de base tipo

péndulo de fricción ha evolucionado de manera general desde el péndulo simple con periodo largo y poca capacidad de desplazamiento, a péndulos de fricción quíntuples de periodo alto y capacidad desplazamiento más alta, como se ilustra en la Figura 16(b) (Sarkisian, Lee, Long, Shook, & Díaz, 2013).

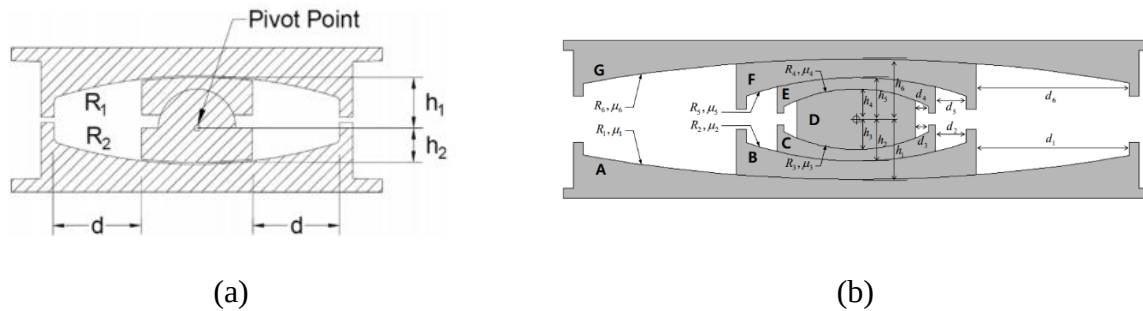


Figura 16.(a) Doble péndulo de fricción (b) Péndulo de fricción quíntuple

Tomado de Calvi & Calvi, 2018; Lee & Constantinou, 2015

A pesar de que se han demostrado los múltiples beneficios de estos sistemas, aún persiste la preocupación por el desempeño ante la acción de aceleraciones verticales producidas por el sismo. Ya que resultados en edificios a escala y resultados en edificios reales que se encuentran instrumentados y que han sido sometidos a eventos sísmicos, han dejado entrever que los sistemas de aislamiento basados en fricción proporcionan aislamiento horizontal, pero se comportan como fijos frente a las aceleraciones verticales (Calvi & Calvi, 2018).

4.2 Colombia frente a las estadísticas internacionales

Colombia es un país que cuenta con el 80% de su población ubicada sobre zonas de riesgo sísmico alto, pero debido a diversas causas socioeconómicas aún no cuenta con una normatividad

propia para el diseño e implementación de dispositivos de aislamiento sísmico (Oviedo & Duque, 2009). El hecho de no tener una normatividad ajustada a los parámetros técnicos y económicos del país y depender de la normatividad norte americana, no permite incentivar el uso de las técnicas de aislamiento sísmico en Colombia (Piscal & López, 2016). Como se puede evidenciar en la Tabla 2, a pesar de lo expuesto anteriormente Colombia ha venido dando pasos hacia la implementación de estos sistemas.

Tabla 2.

Aplicación de aislamiento sísmico de base en edificaciones.

País	Número de edificios aislados
Japón	8000
China	4050
Rusia	600
Italia	400
USA	250
Chile	75
Nueva Zelanda	50
Tailandia	50
Canadá	50
Armenia	45
Turquía	40
México	25
Colombia	20
Perú	10
Ecuador	7

Nota: Tomado de “Consecuencias de la posible aplicación a Colombia de las normas más actuales sobre aislamiento sísmico de edificios” por Piscal & López, 2016. *Revista Internacional de Ingenieria de Estructuras*, 21,4(October), 415–436.

4.3 Implementación del aislamiento sísmico en Colombia

Actualmente, Colombia se ha encaminado a la implementación de nuevas tecnologías en el aislamiento sísmico, debido a los estudios realizados en países desarrollados que muestran la eficacia de las tecnologías de aislamiento sísmico (Rendón, 2009; Piscal & López, 2016). Muestra

de ello es el inicio de la construcción de edificaciones con estos dispositivos, que se dió en el año 2011, con la construcción de la primera clínica aislada sísmicamente del país, con 163 aisladores sísmicos (El Tiempo, 2011); y el aumento en los trabajos de investigación sobre sistemas de aislamiento por parte de algunas universidades en el país, como se muestra en la 0.

Cali tiene la primera clínica antisísmica de Colombia

Comfandi abrió las puertas de una nueva clínica al sur de Cali. La novedad de esta construcción es su sistema de aislamiento sísmico.

Por: REDACCION EL TIEMPO | 02 de diciembre 2011, 12:00 a.m.

Comentar
Es la primera clínica en Colombia, y la segunda construcción en Latinoamérica, después de Chile, diseñada para afrontar este tipo de emergencias. En una ciudad de alto riesgo sísmico como Cali, donde confluyen tres fallas geológicas, se apostó por tecnología japonesa. Aunque tiemble, la edificación permanecerá quieta y lo que se moverán serán los aisladores colocados en cada columna.

Facebook
El aislamiento provee a la edificación de un sistema adicional de resistencia sísmica.

Twitter
La energía generada por el sismo se disipa en el aislador y esa estructura actúa como si fuera un resorte, posibilitando que el edificio se quede quieto.

Guardar
En la Clínica Amiga se ubicaron 83 aisladores, uno por columna.

Enviar

Google+

Figura 17. Primera edificación aislada en Colombia

Tomado de *Cali tiene la primera clínica antisísmica de Colombia* por El Tiempo, 2011

Tabla 3.
Trabajos de grado sobre aislamiento sísmico

Universidad/Año	2018	2017	2016	2015	2014	2013
Universidad Industrial de Santander	2	2	1	1	1	1
Universidad del Valle	2	1	0	1	1	0

Otros ejemplos de edificaciones aisladas en Colombia, a partir del año 2010 son: La clínica Comfandi ubicada en Cali y construida en el año 2011 que cuenta con 163 aisladores (Figura 18); la universidad Autónoma de Manizales, construida en 2014 que cuenta en 42 aisladores y 31

deslizadores (Figura 20); la clínica Imbanaco en Cali, construida 2015 y cuenta con 114 aisladores sísmico (Figura 21); la universidad de Manizales construida en 2017, cuenta con 12 aisladores y 8 deslizadores (Figura 23); y el primer puente aislado que corresponde al viaducto helicoidal en el municipio de Santa rosa de cabal (Figura 19).



*Figura 18.*Clínica Comfandi, Cali, 2011

Tomado de “Aislamiento Sísmico de Edificaciones y Puentes. In Sociedad Colombiana de Ingenieros” por Oviedo, 2018, Bogotá. *Jornadas XVII Geotécnicas y XX Estructurales*.



Figura 19. Viaducto helicoidal, santa rosa de cabal-Primer puente aislado

Tomado de “Aislamiento Sísmico de Edificaciones y Puentes. In Sociedad Colombiana de Ingenieros” por Oviedo, 2018, Bogotá. *Jornadas XVII Geotécnicas y XX Estructurales.*



Figura 20. U Autónoma de Manizales, 2014

Tomado de “Aislamiento Sísmico de Edificaciones y Puentes. In Sociedad Colombiana de Ingenieros” por Oviedo, 2018, Bogotá. *Jornadas XVII Geotécnicas y XX Estructurales.*



*Figura 21.*Clínica Imbanaco, Cali 2015

Tomado de “Aislamiento Sísmico de Edificaciones y Puentes. In Sociedad Colombiana de Ingenieros” por Oviedo, 2018, Bogotá. *Jornadas XVII Geotécnicas y XX Estructurales*.



*Figura 22.*Puente calle 33, Manizales, 2016

Tomado de “Aislamiento Sísmico de Edificaciones y Puentes. In Sociedad Colombiana de Ingenieros” por Oviedo, 2018, Bogotá. *Jornadas XVII Geotécnicas y XX Estructurales*.



Figura 23. Universidad de Manizales, 2017

Tomado de “Aislamiento Sísmico de Edificaciones y Puentes. In Sociedad Colombiana de Ingenieros” por Oviedo, 2018, Bogotá. *Jornadas XVII Geotécnicas y XX Estructurales*.

Las implementaciones de las técnicas de aislamiento sísmico de base en Colombia han sido orientadas a las edificaciones de los grupos III y IV contemplados en la NSR-10 y a los puentes, ya que la operación de estas edificaciones después de un evento sísmico es fundamental para preservar la salud, la seguridad de las personas y la atención a la comunidad. Su uso en edificaciones de ocupación normal es limitado, debido a que la aplicación de la norma sismo resistente tiene como prioridad salvaguardar la vida y la propiedad (en ese orden), lo cual hace que el factor económico de la aplicación de estas tecnologías sea un aspecto a tener en cuenta. (Comisión asesora permanente para el régimen de construcciones sismo resistente, 2010)

En relación a la estadística presentada en el año 2015 de las edificaciones aisladas sísmicamente en Colombia (Piscal & López, 2016) se puede evidenciar en el último censo realizado por el comité

AIS700, la construcción de tres edificaciones aisladas más, en los últimos tres años (Oviedo, 2018) como se aprecia en la Figura 24.

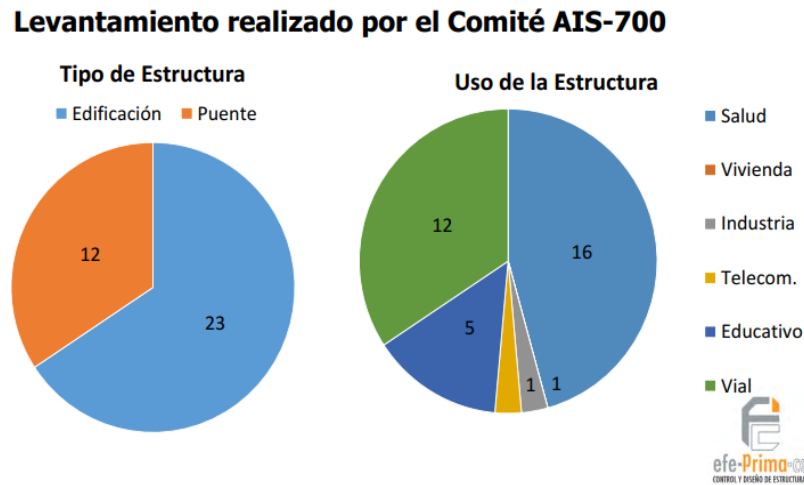


Figura 24. Edificaciones aisladas sísmicamente año 2018

Tomado de “Aislamiento Sísmico de Edificaciones y Puentes. In Sociedad Colombiana de Ingenieros” por Oviedo, 2018, Bogotá. *Jornadas XVII Geotécnicas y XX Estructurales*.

La estadística anterior demuestra que en Colombia existe cada vez un interés mayor en implementar sistemas de aislamiento sísmico de base, tanto de la industria como de la comunidad científica. Como ejemplo: en mayo 28 de 2018 en el Laboratorio Marco de Pruebas para Homologaciones de la Escuela de Ingeniería Civil y Geomática de la universidad del valle se realizó el primer ensayo a escala real de dos aisladores sísmicos SREI fabricados en Colombia (Grupo de Investigación en Ingeniería Sísmica, Eólica, 2018), en la universidad de los Andes se realizó un “Estudio Experimental de Aisladores Sísmicos Tipo Péndulo de Fricción en Modelos a Escala Reducida” (Moreno, Yamín, & Reyes, n.d.), en convenio con la empresa consultora Ecuas, la universidad EAFIT desarrolló un “dispositivo para la disipación de movimientos telúricos en estructuras esbeltas”, este dispositivo fue desarrollado en el laboratorio de sismica de la universidad

(Universidad EAFIT, 2017), en la Universidad industrial de Santander, se realizó el “análisis experimental de de aisladores tipo péndulo de fricción” (Jaimes Rodriguez, 2014).

4.4 Marco legal en colombia

Actualmente, Colombia no cuenta con una normativa propia sobre el diseño de estructuras aisladas sísmicamente en su base, la sección A.3.8 del reglamento NSR-10 se remite a las siguientes normas internacionales (Comisión asesora permanente para el regimen de construcciones sismo resistente, 2010)

- “NEHRP Recommended Provisions for Seismic regulations for New Building-Provisions and Commentary”, 2003 Edition, FEMA 450.
- “Minimun Design Loads for Building and Other Structures”, ASCE/SEI 7-05.

Algunas de las normas internacionales que incluyen el diseño de aisladores sísmicos de base son:

Tabla 4.
Normativas de Diseño

País	Año	Norma
USA	2010/2016	ASCE 7
USA	2003	FEMA 450
USA	2015	FEMA P-1050-1
Chile	2013	NCh-2745
Japón	2000	BSLEO
China	2010	GB50011
Italia	2008	NTC
Eurocódigo	2009	EN15129
Rusia	2014	SP 14 13330
México	2008	Manual de Diseño de Obras Civiles

Nota: Adaptado de “Aislamiento Sismico de Edificaciones, Aplicacion en Colombia. In

Universidad Industrial de Santander” por Piscal, 2017, Bucaramanga. XXVI Semana Técnica

Ingeniería Civil.

En esta sección se ha presentado el desarrollo tecnológico del péndulo de fricción como sistema de aislamiento sísmico, desde su implementación en la ingeniería sísmica mundial hasta el creciente interés en las aplicaciones que este tipo de sistema de control puede tener en la ingeniería en Colombia. A continuación, se describen los tipos de péndulo de fricción desarrollados hasta el momento, haciendo énfasis en sus características mecánicas, comportamiento físico, además de las principales ventajas y desventajas sobre el comportamiento dinámico estructural.

5. Aisladores de Base Tipo Péndulo de Fricción

5.1 Aisladores de primera generación- Péndulo de Fricción Simple (SFP)

El péndulo de fricción simple (SFP, por sus siglas en inglés) fue descrito originalmente en 1987 por V Zayas et al., (1987). El SFP se compone de un deslizador articulado que se mueve sobre una superficie cóncava de radio R , tanto el deslizador como la superficie están hechos de acero y cubiertos con una capa de Teflon, la función de esta capa de teflón es reducir el coeficiente de fricción entre las superficies de a 1% a 15% (Ver Figura 25). Los parámetros que definen el comportamiento del aislador SFP son el radio de curvatura de la superficie cóncava R , el coeficiente de fricción μ y la capacidad de desplazamiento d (Nguyen, Nguyen, Hoang, & Huong, 2018); la fricción permite disipar la energía y el radio de curvatura incrementa el periodo de vibración de la estructura (Cango P. & Flores S., 2018).

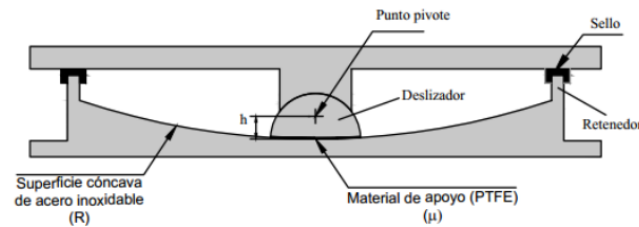


Figura 25. Sección transversal del aislador de péndulo de fricción simple

Tomado de *Diseño y análisis de edificaciones con aisladores de base tipo FPT* por Cango P. &

Flores S., 2018. Universidad de Cuenca. Recuperado de:

<http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/30283>

Según Villavicencio C & Díaz M (2015), el péndulo de fricción simple presenta como ventajas su fácil instalación, y su altura, la cual es más baja comparada con otros dispositivos de aislación.

5.1.1 Modelo físico del aislador de péndulo de fricción simple. El movimiento del aislador es función de la magnitud de la fuerza horizontal F generada por el movimiento del suelo; si el movimiento del suelo es leve y la fuerza F es menor a la fricción entre el deslizador y la superficie F_f , no se producirá deslizamiento del aislador y la base de la estructura se comportará como empotrada, por el contrario, si el movimiento del suelo es fuerte y la fuerza F supera la fuerza de fricción F_f , el aislador se desplazará horizontalmente una magnitud u . Si el desplazamiento u excede la capacidad de desplazamiento del aislador d , los topes en el borde de la superficie impedirán el desplazamiento del aislador mediante una fuerza de impacto F_i . La trayectoria del movimiento del péndulo simple se muestra en la Figura 26, a medida que el aislador se mueve de la posición A a E, el punto P en el centro del aislador sigue una trayectoria circular. Las fuerzas y los desplazamientos horizontales se muestran en la Figura 27. (Nguyen et al., 2018)

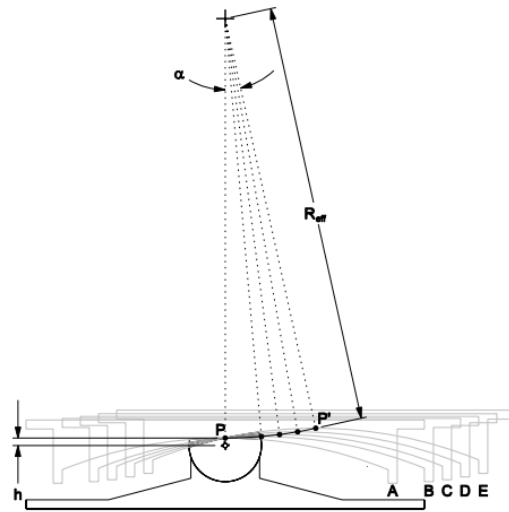


Figura 26. Ilustración del movimiento de la estructura soportada

Tomado de *Mechanical Behavior of Multi-Spherical Sliding Bearings. Technical Report MCEE-08-0007* por Fenz & Constantinou, 2008b, New York.

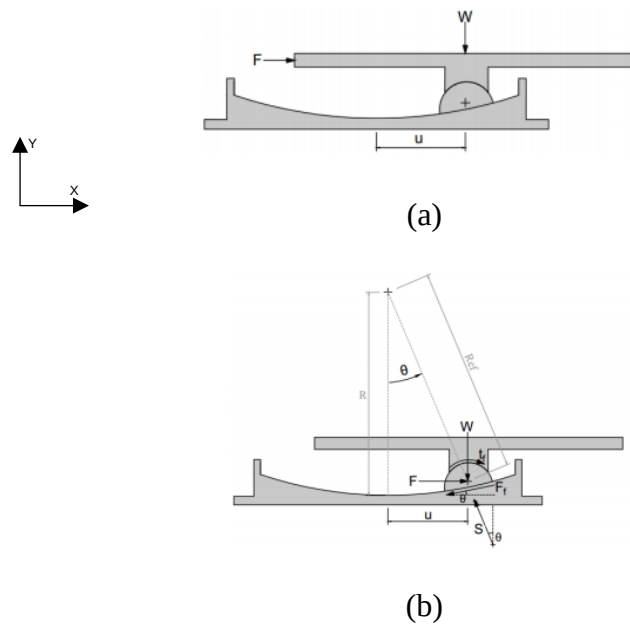


Figura 27. Aislador SFP. (a) Posición deformada (b) Diagrama de cuerpo libre

Tomado de *Diseño y análisis de edificaciones con aisladores de base tipo FPT* por Cango P. & Flores S., 2018. Universidad de Cuenca. Recuperado de:

<http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/30283>

Del equilibrio de fuerzas del aislador en posición deformada, se tiene que:

$$\begin{aligned}\sum F_x &= 0 \rightarrow F - S \sin \theta - F_f \cos \theta = 0 \\ \sum F_y &= 0 \rightarrow S \cos \theta - W - F_f \sin \theta = 0\end{aligned}\tag{1}$$

Donde W es la carga soportada por el aislador, S es la fuerza normal de reacción de la superficie curva al deslizador, F_f es la fuerza de fricción $= \mu W$, la cual incluye el efecto de las tracciones a lo largo de la superficie esférica del deslizador y θ el ángulo de rotación del deslizador. El coeficiente de fricción es una función que depende de la velocidad de deslizamiento y la presión (Mokha, Constantinou, & Reinhorn, 1990). Por geometría se tiene que:

$$u = R_{ef} \sin \theta\tag{2}$$

El radio de curvatura efectivo $R_{ef} = R - h$, se define como la distancia radial desde el centro de la superficie esférica hasta el punto de pivote del deslizador. Reemplazando las ecuaciones (2) y (3) en las ecuaciones (1) se tiene que:

$$F = \frac{W}{R_{ef} \cos \theta} u + \frac{\mu W}{\cos \theta}\tag{3}$$

En general, el radio de curvatura R es mayor al desplazamiento u (Ver Figura 27), por lo cual el ángulo θ se asume que es muy pequeño, y $\cos \theta \approx 1$.

$$F = \frac{W}{R_{ef}} u + \mu W\tag{4}$$

De la ecuación (4), la fuerza de restitución por efecto de la gravedad es Wu/R_{ef} y la componente de disipación de energía es μW (Cango P. & Flores S., 2018). La rigidez horizontal k_b del aislador es:

$$k_b = \frac{W}{R_{ef}}\tag{5}$$

El periodo natural de vibración del aislador SFP se determina a partir de la siguiente ecuación:

$$T_b = 2\pi \sqrt{\frac{W/g}{k_b}} = 2\pi \sqrt{\frac{R_{ef}}{g}} \quad (6)$$

Si se aplica la fuerza de impacto F_r a la ecuación (4), la relación fuerza- desplazamiento que gobierna el movimiento del aislador SFP se representa por:

$$F = \frac{W}{R_{ef}} u + F_f + F_r \quad (7)$$

El ciclo de histéresis se muestra en la siguiente figura:

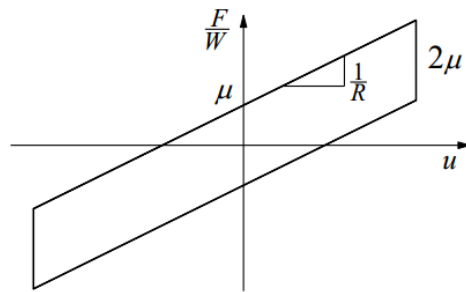


Figura 28. Ciclo de histéresis del aislador SFP

Tomado de “Performance of Single Friction Pendulum bearing for isolated buildings subjected to seismic actions in Vietnam” por Nguyen et al., 2018. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 143(1). Recuperado de: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/143/1/012048>

5.1.2 Modelo dinámico del aislador de péndulo de fricción simple. El modelo numérico del aislador se compone de tres elementos en paralelo, un resorte lineal de rigidez k_b , un elemento de fricción con coeficiente de fricción μ_e y un elemento que representa la capacidad de desplazamiento o desplazamiento límite $d_e=d$. (Ver Figura 29).

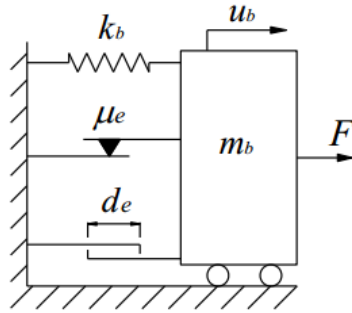


Figura 29. Modelo numérico de un aislador SFP.

Tomado de “Performance of Single Friction Pendulum bearing for isolated buildings subjected to seismic actions in Vietnam” por Nguyen et al., 2018. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 143(1). Recuperado de: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/143/1/012048>

El movimiento de una estructura aislada puede ser representado a partir de sus características de desplazamiento u_i , velocidad $\dot{u}_i$, y aceleración $\ddot{u}_i$. El modelo numérico 2-D (en planta) de una estructura aislada en su base (Figura 30) cuenta con dos grados de libertad por piso, uno por cada dirección horizontal (x y y), y $(2n+2)$ grados de libertad en total, siendo n el número de pisos de la estructura. Las características físicas por piso y por dirección lateral son: masa m_i , rigidez k_i y coeficiente de amortiguamiento c_i . Se supone que la superestructura se comporta en el rango lineal elástico y el aislador en el rango no lineal. Las características físicas del aislador son: masa m_b , que corresponde a la masa de todos los pisos por encima del aislador, rigidez k_b , coeficiente de fricción μ_e y desplazamiento límite d_e (Nguyen et al., 2018).

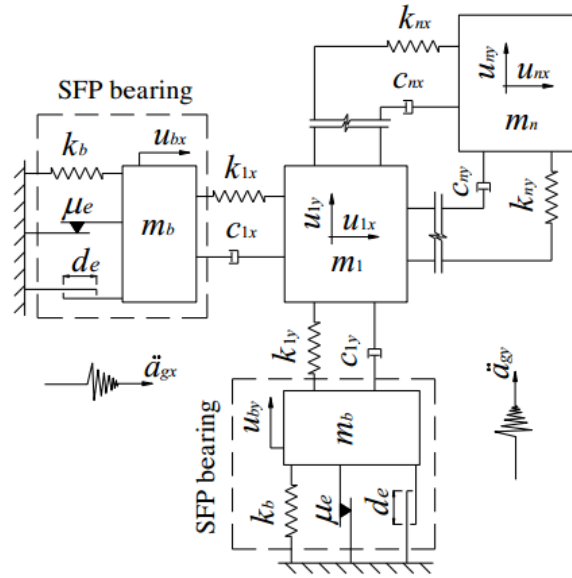


Figura 30. Modelo 2-D de una estructura sísmicamente aislada con apoyos SFP

Tomado de “Performance of Single Friction Pendulum bearing for isolated buildings subjected to seismic actions in Vietnam” por Nguyen et al., 2018. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 143(1). Recuperado de: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/143/1/012048>

El comportamiento dinámico del modelo en dirección x se puede expresar por medio del siguiente sistema de ecuaciones:

$$\left\{ \begin{array}{l} m_b(\ddot{u}_{bx} + \ddot{u}_{gx}) + k_{bx}u_{bx} + F_{fx} + F_{rx} + k_{1x}(u_{bx} - u_{1x}) + c_{1x}(\dot{u}_{bx} - \dot{u}_{1x}) = 0 \\ m_1(\ddot{u}_{1x} + \ddot{u}_{gx}) + k_{1x}(u_{1x} - u_{bx}) + c_{1x}(\dot{u}_{1x} - \dot{u}_{bx}) + k_{2x}(u_{1x} - u_{2x}) + c_{2x}(\dot{u}_{1x} - \dot{u}_{2x}) = 0 \\ \vdots \\ m_n(\ddot{u}_{nx} + \ddot{u}_{gx}) + k_{nx}(u_{nx} - u_{(n-1)x}) + c_{nx}(\dot{u}_{nx} - \dot{u}_{(n-1)x}) = 0 \end{array} \right\} \quad (8)$$

Donde los términos con subíndice b hacen referencia al aislador, y los términos 1 a n al número de pisos.

5.2 Aisladores de segunda generación- Péndulo de Fricción Cóncavo Doble (DCFP)

El péndulo de fricción cóncavo doble (DCFP, por sus siglas en inglés) consiste en dos superficies paralelas cóncavas de acero inoxidable separadas por un deslizador articulado, como se muestra en la Figura 31. La articulación del deslizador es necesaria pues permite una distribución uniforme de presión entre la interfaz de deslizamiento.

Los parámetros técnicos que definen el comportamiento del aislador DCFP son el radio de curvatura R_1 y R_2 de las placas inferior y superior, respectivamente; el coeficiente de fricción entre estas superficies μ_1 y μ_2 ; las alturas del deslizador h_1 y h_2 , que corresponden a la distancia radial entre el punto de pivote y las superficies inferior y superior, respectivamente; y la capacidad nominal de desplazamiento del deslizador a través de la superficie inferior y superior d_1 y d_2 , respectivamente. La capacidad nominal de desplazamiento total del aislador es $d_1 + d_2$ (Fenz & Constantinou, 2008b).

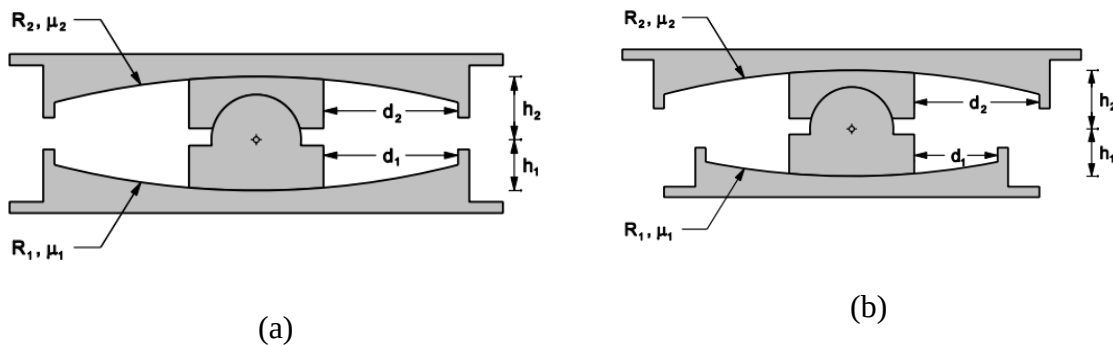


Figura 31. Sección transversal del aislador de péndulo de fricción cóncavo doble (a) capacidad de desplazamiento igual y (b) capacidad de desplazamiento diferente

Tomado de *Mechanical Behavior of Multi-Spherical Sliding Bearings. Technical Report MCEE-08-0007* por Fenz & Constantinou, 2008b, New York.

El punto alrededor del cual el aislador rota, definido como punto de pivote, se representa por medio de una cruz en la Figura 31. Las fuerzas transmitidas por el aislador actúan en este punto, por lo tanto, el radio de curvatura efectivo es $R_{ef1} = R_1 - h_1$ y $R_{ef2} = R_2 - h_2$.

Las principales ventajas del aislador DCFP son: la reducción de dimensiones en planta con capacidad de desplazamiento igual a un aislador SFP (Ponzo, Cesare, Leccese, & Nigro, 2015), la posibilidad de optimizar el diseño para dos valores de demanda sísmica, en función de la rigidez y el amortiguamiento de las dos placas del aislador DFCP (Cango P. & Flores S., 2018). Además, debido a la distribución equitativa de momentos entre la superficie superior e inferior, estas están menos esforzadas en comparación al aislador simple (Villavicencio C & Díaz M, 2015).

5.2.1 Modelo físico del aislador de péndulo de fricción cóncavo doble. La relación fuerza-desplazamiento del aislador DCFP fue desarrollada por Fenz & Constantinou (2006). El mecanismo de movimiento es el siguiente: si la fuerza F generada por el movimiento del suelo no sobrepasa la fricción entre el deslizador y la superficie superior, ni la fricción entre el deslizador y la superficie inferior, no se presentará desplazamiento en el aislador. Cuando la fuerza F sea mayor a la fuerza de fricción entre las superficies se generará un desplazamiento u .

Si los coeficientes de fricción son diferentes, el movimiento del aislador se presenta en tres fases: (a) la primera fase corresponde al deslizamiento a lo largo de la superficie de menor fricción (Figura 32a), (b) la segunda fase se presenta cuando ocurre deslizamiento simultáneo en las dos superficies, lo cual se presenta cuando la fuerza F supera la fricción de las dos superficies (Figura 32b), y (c) una tercera fase que corresponde al deslizamiento en una de las superficies, después de que la otra superficie ha alcanzado su máxima capacidad de desplazamiento (Figura 32c). A

continuación, se realiza un resumen de las tres fases de movimiento y se presentan las ecuaciones de equilibrio respectivas:

5.2.1.1 Fase de movimiento I. La fase de movimiento I inicia con el deslizamiento sobre la superficie 1, cuando la fuerza horizontal F supera a la fuerza de fricción. En la Figura 32(a) se muestra el diagrama de cuerpo libre correspondiente a esta fase. Del equilibrio de fuerzas en la placa inferior (FBD III) se tiene que:

$$\begin{aligned}\sum F_x &= 0 \rightarrow F_{f1}\cos\theta_1 + S_1\sin\theta_1 - F = 0 \\ \sum F_y &= 0 \rightarrow W - S_1\cos\theta_1 + F_{f1}\sin\theta_1 = 0\end{aligned}\tag{9}$$

Donde W es la fuerza vertical actuando en el punto de pivote, θ_1 es el ángulo de rotación del deslizador respecto a la superficie 1 y S_1 y S_2 las fuerzas normales en la superficie 1 y 2, respectivamente. Por geometría, el desplazamiento relativo del aislador en la superficie inferior u_1 es:

$$u_1 = R_{ef1}\sin\theta_1\tag{10}$$

De las ecuaciones (9) y (10) se obtiene la relación fuerza - desplazamiento que gobierna la fase I de movimiento del aislador DCFP:

$$F = \frac{W}{(R_1 - h_1)}u + F_{f1}\tag{11}$$

5.2.1.2 Fase de movimiento II. La fase de movimiento II se presenta con el deslizamiento simultáneo de las superficies 1 y 2; y termina cuando el deslizamiento en la superficie 1 alcanza su capacidad máxima. En la Figura 32(b) se muestra el diagrama de cuerpo libre del aislador durante esta fase (Fenz & Constantinou, 2008b). Para el aislador completo, el desplazamiento total es la suma de los desplazamientos en la superficie superior y en la superficie inferior $u = u_1 + u_2$, por lo cual la relación fuerza-desplazamiento es:

$$F = \left(\frac{W}{R_{eff1} + R_{eff2}} \right) u + \left(\frac{F_{f1}R_{eff1} + F_{f2}R_{eff2}}{R_{eff1} + R_{eff2}} \right) \quad (12)$$

5.2.1.3 Fase de movimiento III. La tercera fase de movimiento corresponde al deslizamiento en la superficie 2, después de que la otra superficie ha alcanzado su máxima capacidad de desplazamiento. Después de alcanzar la capacidad de desplazamiento d_1 , el deslizador entra en contacto con el retenedor lo que introduce una fuerza adicional en la superficie 1, $F_{r1} = F - F_{dr1}$. Los diagramas de cuerpo libre de esta fase de movimiento se muestran en la Figura 32(c). La relación fuerza-desplazamiento en la superficie 2 se expresa a partir de la ecuación:

$$F = \frac{W}{R_{eff2}} (u - d_1) + F_{f2} \quad (13)$$

Las ecuaciones que gobiernan el desplazamiento del péndulo de fricción doble cóncavo para las tres fases de movimiento se resume en la Tabla 5.

Tabla 5.

Resumen del comportamiento del aislador DCFP

Regime	Description	Force-Displacement Relationship
I	Sliding on surface 1 only	$F = \frac{W}{R_{eff1}} u + F_{f1}$ $\text{Valid until: } F = F_{f2}, \quad u = u^* = (\mu_2 - \mu_1) R_{eff1}$
II	Simultaneous sliding on surfaces 1 and 2	$F = \frac{W}{R_{eff1} + R_{eff2}} u + \frac{F_{f1} R_{eff1} + F_{f2} R_{eff2}}{R_{eff1} + R_{eff2}}$ $\text{Valid until: } F = F_{dr1} = \frac{W}{R_{eff1}} d_1 + F_{f1}, \quad u = u_{dr1} = d_1 \left(1 + \frac{R_{eff2}}{R_{eff1}} \right) - (\mu_2 - \mu_1) R_{eff2}$
III	Slider bears on restrainer of surface 1; Sliding on surface 2	$F = \frac{W}{R_{eff2}} (u - d_1) + F_{f2}$
Assumptions: (1) $\mu_1 < \mu_2$, (2) $d_1 < \frac{R_{eff1}}{R_{eff2}} d_2 + (\mu_2 - \mu_1) R_{eff1}$		

Tomado de *Mechanical Behavior of Multi-Spherical Sliding Bearings. Technical Report MCEE-08-0007* por Fenz & Constantinou, 2008b, New York.

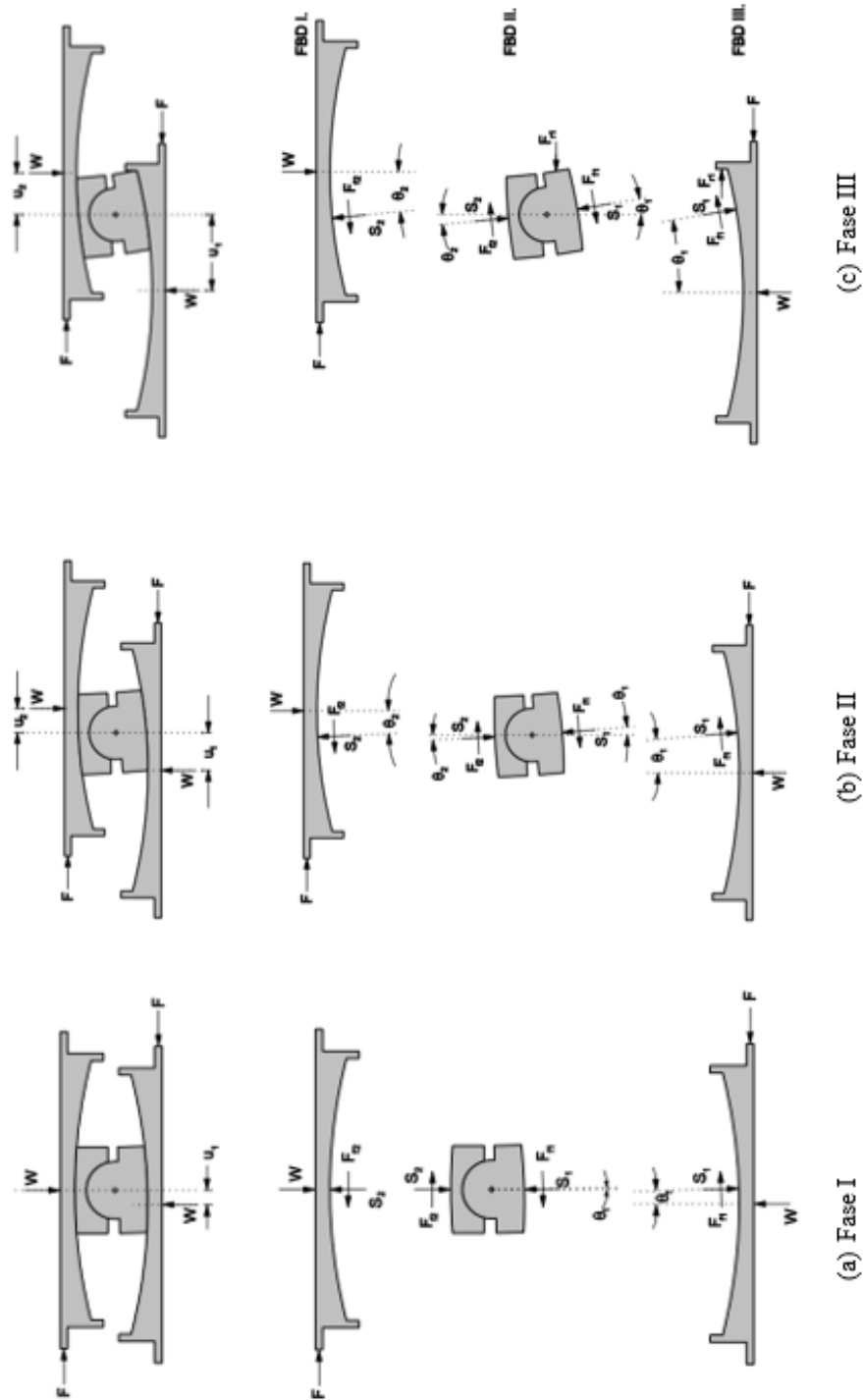


Figura 32. Diagramas de cuerpo libre del aislador DCFP

Tomado de *Mechanical Behavior of Multi-Spherical Sliding Bearings. Technical Report*

MCEE-08-0007 por Fenz & Constantinou, 2008b, New York.

El ciclo de histéresis del aislador es función de los coeficientes de fricción de las superficies cóncavas. En el caso en que estos sean iguales ($\mu_2 = \mu_1$), las dos superficies se deslizarán simultáneamente y la curva resultante fuerza-desplazamiento tendrá un comportamiento bilineal (Figura 33(a)). Según Kim & Yun (2007), el periodo de la estructura aislada durante este régimen puede ser descrito por la ecuación 14 y es independiente de la masa de la superestructura.

$$T_{comb} = 2\pi \sqrt{\frac{R_1 + R_2}{g}} = \sqrt{T_1^2 + T_2^2} \quad (14)$$

$$T_1 = 2\pi \sqrt{\frac{R_1}{g}} \quad , \quad T_2 = 2\pi \sqrt{\frac{R_2}{g}} \quad (15)$$

T_1 y T_2 son los periodos restauradores de la superficie inferior y superior, respectivamente.

Por otro lado, si los dos coeficientes de fricción son diferentes ($\mu_2 \neq \mu_1$), el aislador presentará un comportamiento tri lineal descrito por un movimiento que inicia en la superficie de menor coeficiente de fricción y continúa en esta superficie hasta una distancia u^* (Figura 33(b)). Durante esta fase, el periodo aislado es igual a T_1 para $\mu_1 < \mu_2$ e igual a T_2 para $\mu_1 > \mu_2$ (Ver ecuación 15). Cuando se excede el desplazamiento u^* el movimiento se presenta simultáneamente en las dos superficies, en esta fase el periodo aislada es igual a T_{comb} (Khoshnoudian & Hemmati, 2011). Según Constantinou (2004) , para DCFPs con comportamiento trilineal, se asume un coeficiente de fricción equivalente igual a :

$$\mu_{eq} = \frac{\mu_1(R_1 - h_1) + \mu_2(R_2 - h_2)}{R_1 + R_2 - h_1 - h_2} \quad (16)$$

$$u^* = (\mu_2 - \mu_1)(R_1 - h_1) \quad (17)$$

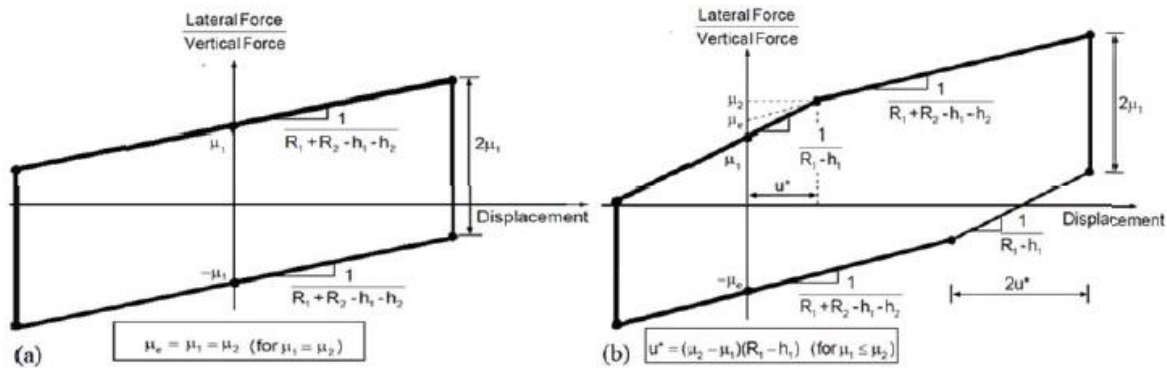


Figura 33. Curva de histéresis (a) bilineal y (b) trilineal

Tomado de “Seismic response of base-isolated structures using DCFP bearings with tri-linear and bi-linear behaviors” por Khoshnoudian & Hemmati, 2011. *Procedia Engineering*, 14, 3027–3035.

Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.07.381>

Un cambio en el comportamiento del aislador de péndulo doble de bi-lineal a tri-lineal resulta en diferencias en los desplazamientos del aislador y el cortante basal de la estructura. Estos cambios dependen de las características de la fuente de excitación en la estructura. Debido al fenómeno de directividad de la ruptura en registros cercanos a la fuente sísmogénica (*near-fault earthquakes*), la componente perpendicular a la falla presenta pulsos con frecuencias más altas en comparación con la componente paralela a la falla, lo cual es un efecto importante a considerar en el diseño de los aisladores. Mohammadi & Nouri (2017) han investigado el efecto de los sismos cercanos a la falla en las estructuras aisladas con péndulos de fricción doble encontrando que en sismos cercanos a la falla, un comportamiento trilineal incrementa la respuesta de cortante basal en comparación con el comportamiento bilineal, contrario a lo que sucede en sismos de falla lejana, en los cuales se presenta una reducción en el cortante basal al comparar los dos comportamientos. Con relación a los desplazamientos del aislador, sin importar el tipo de registro (cercano o lejano

a la falla) considerar un comportamiento trilineal reduce la respuesta de desplazamientos en el aislador.

Según Rabiei & Khoshnoudian (2013), la energía disipada por ciclo para un pico de desplazamiento específico u_b , se puede calcular a partir de:

$$W_{Dbi} = 4\mu_{eq}Wu_b \quad (18)$$

$$W_{Dtri} = 4W[\mu_{eq}u_bu_y(\mu_{eq}\mu_1)] \quad (19)$$

Donde W_{Dbi} y W_{Dtri} corresponden a la energía disipada en un ciclo bilineal y un ciclo trilineal, respectivamente y μ_{eq} y μ_y se calculan por medio de las siguientes ecuaciones:

$$\mu_{eq} = \frac{R_{eff1}\mu_1 + R_{eff2}\mu_2}{R_{eff1} + R_{eff2}} \quad (20)$$

$$u_y = \frac{\mu_{eq}\mu_1}{\frac{1}{R_{eff1}} + \frac{1}{R_{eff1}+R_{eff2}}} \quad (21)$$

La rigidez efectiva del aislador se puede calcular a partir de la siguiente ecuación, tanto para un sistema bilineal como trilineal:

$$K_{eff,bi} = K_{eff,tri} = \frac{1}{R_{eff1} + R_{eff2}} + \frac{W\mu_{eq}}{u_b} \quad (22)$$

5.2.2 Modelo dinámico del aislador de péndulo de fricción cóncavo doble. El comportamiento del aislador de péndulo de fricción cóncavo doble puede ser modelado fácilmente usando dos aisladores de fricción simple conectados en serie, como se muestra en la Figura 34. Los elementos que resisten la carga para cada una de las superficies tienen un arreglo paralelo compuesto por un elemento de fricción dependiente de la velocidad, un elemento de resorte que tiene en cuenta la rigidez de la curvatura de la superficie y un elemento que tiene en cuenta la capacidad de desplazamiento de cada superficie (Fenz & Constantinou, 2008b). Para el caso más simple donde $R_1 - h_1 = R_2 - h_2$ y $\mu_1 \approx \mu_2$, el comportamiento dinámico del aislador puede ser modelado como un aislador SFP con radio de curvatura R igual a $R_1 + R_2 - h_1 - h_2$ y coeficiente de fricción μ determinado experimentalmente. (Fenz & Constantinou, 2006).

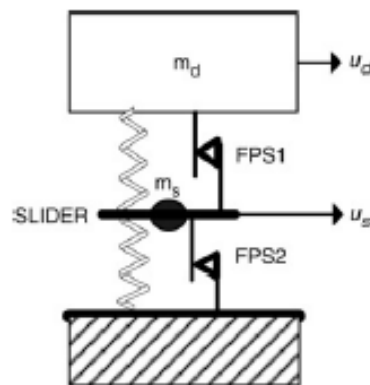


Figura 34. Modelo matemático de un aislador DCFP.

Tomado de “Seismic response characteristics of bridges using double concave friction pendulum bearings with tri-linear behavior” por Kim & Yun, 2007. *Engineering Structures*, 29(11), 3082–3093. Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2007.02.009>.

La Figura 35 presenta un modelo numérico 3-D de una estructura de un solo piso montada sobre aisladores DCFP. Las variables m_s y m_b corresponde a las masas de las placas rígidas del piso y de la base, respectivamente. β representa la relación entre la frecuencia de vibración vertical y horizontal. Se supone que la superestructura se comporta en el rango lineal elástico y el aislador en el rango no lineal. El comportamiento dinámico puede ser descrito por tres grados de libertad por placa, donde u_{xs} , u_{ys} y u_{zs} corresponden a los desplazamientos relativos de la superestructura con respecto a la base y u_{xb} , u_{yb} y u_{zb} corresponden a los desplazamientos relativos de la base con respecto al suelo en dirección x , y y z respectivamente (Khoshnoudian & Rabiei, 2010). Las ecuaciones de movimiento de este modelo en dirección X se pueden expresar por:

$$m_d \ddot{u}_{dx} + c_x \dot{u}_{dx} + k_x u_{dx} = -m_d \ddot{u}_{gx} \quad (23)$$

$$m_b \ddot{u}_{bx} - c_x \dot{u}_{bx} - k_x u_{dx} + k_{b1} r_1 u_{bx} - k_{b1} r_1 u_{sx} + F_{x1} = -m_b \ddot{u}_{gx} \quad (24)$$

$$m_s \ddot{u}_{sx} - k_{b1} r_1 u_{bx} + (k_{b1} r_1 + k_{b2} r_2) u_{sx} + (F_{x2} - F_{x1}) = -m_s \ddot{u}_{gx} \quad (25)$$

La ecuación (23) hace referencia al piso de la estructura, la ecuación (24) a la base y la ecuación (25) al deslizador. Las variables m_d , m_b y m_s corresponden a la masa del piso, de la base y del deslizador, respectivamente, c_x es el coeficiente de amortiguamiento y k_x la rigidez por piso de la estructura en dirección x ; las variables $\ddot{u}_{dx}$, $\ddot{u}_{bx}$ y $\ddot{u}_{sx}$ se refieren a la componente de aceleración del piso, la masa de la base y el deslizador respectivamente; $\dot{u}_{dx}$ y $\dot{u}_{bx}$ corresponden a la componente de velocidad del piso y de la masas de base; u_{dx} , u_{bx} y u_{sx} son las componentes de desplazamiento del piso, la masa de la base y el deslizador respectivamente; r_1 y r_2 son factores sísmicos; F_{x1} y F_{x2} las fuerzas de fricción y $\ddot{u}_{gx}$ la componente de aceleración del suelo (Shah & Psoni, 2017).

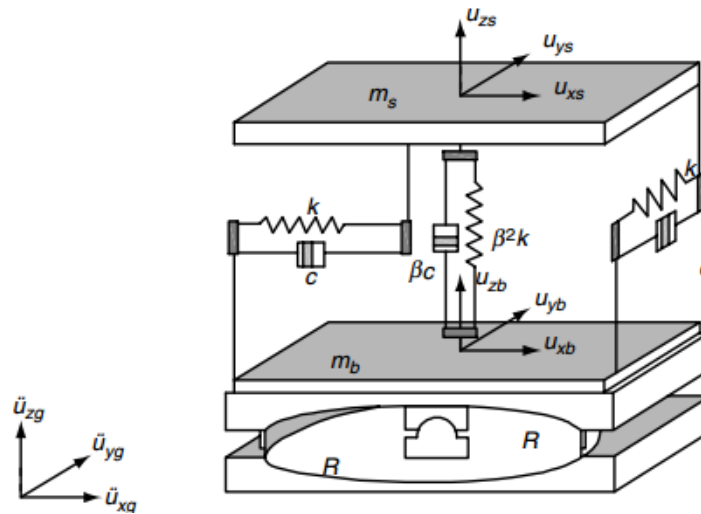


Figura 35. Estructura 3D de un piso sobre un aislador DCFP

Tomado de “Seismic Response of Double Concave Friction Pendulum Base-Isolated Structures considering Vertical Component of Earthquake” por Khoshnoudian & Rabiei, 2010. *Advances in Structural Engineering*, 13(1), 1–13. Recuperado de: <https://doi.org/10.1260/1369-4332.13.1.1>

La dinámica de las estructuras aisladas es un problema altamente no lineal debido a su mecanismo de fricción. Autores como Westermo & Udwadia (1983) y Mostaguel, Hejazi, & Tanbakuchi (1983) han propuesto soluciones analíticas, pero por su complejidad estas son válidas sólo para movimientos armónicos de sistemas hasta de dos grados de libertad y bajo condiciones idealizadas. Por esta razón, estudios precedentes han implementado soluciones numéricas de la respuesta permanente a modelos más cercanos al comportamiento real de las estructuras aisladas, teniendo en cuenta efectos como la fuerza de fricción dependiente de la velocidad (Kumar, Whittaker, & Constantinou, 2014), el análisis ante excitaciones del suelo triaxiales (Shah & Psoni, 2017), el análisis de la componente vertical de la demanda sísmica (Rabiei & Khoshnoudian, 2011) y la influencia de las fuerzas de inercia verticales en el comportamiento del aislador (Raftoyiannis & Michaltsos, 2017).

El mecanismo de operación de los aisladores de péndulo de fricción cóncavo doble es función de la fuerza axial de compresión, sin embargo, estos pueden presentar comportamientos no previstos en el diseño cuando la fuerza de compresión disminuye o se presenta fuerzas de tensión que provoquen separación o levantamiento de los componentes del aislador. Este comportamiento se puede presentar en función de la componente vertical de la demanda sísmica, por lo que ignorar su influencia puede conllevar a errores en el diseño. Khoshnoudian & Rabiei (2010) han encontrado que cuando el periodo de la superestructura aumenta, el error inducido por ignorar la componente vertical del sismo en la determinación del máximo cortante basal de la estructura disminuye. Por otro lado, la variación del periodo de la superestructura no tiene efecto en el error causado por despreciar la componente vertical en la determinación del máximo desplazamiento del aislador.

5.3 Aisladores de tercera generación- Péndulo de Fricción Triple (TFP)

El péndulo de fricción triple (TFP, por sus siglas en inglés) es una extensión del péndulo de fricción simple, se compone de cuatro placas cóncavas y un deslizador rígido (Figura 36). Las múltiples superficies cóncavas proveen al aislador un “comportamiento adaptativo”, lo que significa que se puede adaptar a varios niveles de movimientos del suelo (Calvi & Calvi, 2018). A medida que el desplazamiento cambia, la rigidez, la resistencia y la fricción efectiva varían dependiendo sobre qué superficie esté ocurriendo el deslizamiento. (Fenz & Constantinou, 2008a)

Los parámetros técnicos que definen el comportamiento del aislador TFP constan de doce parámetros geométricos y cuatro parámetros mecánicos. Los parámetros geométricos son: radio de curvatura de cada superficie R_1, R_2, R_3, R_4 ; altura a cada componente h_1, h_2, h_3, h_4 y la capacidad de desplazamiento nominal de cada superficie d_1, d_2, d_3, d_4 . Los parámetros mecánicos

corresponden a los coeficientes de fricción $\mu_1, \mu_2, \mu_3, \mu_4$ que actúan en las superficies (McVitty & Constantinou, 2015).

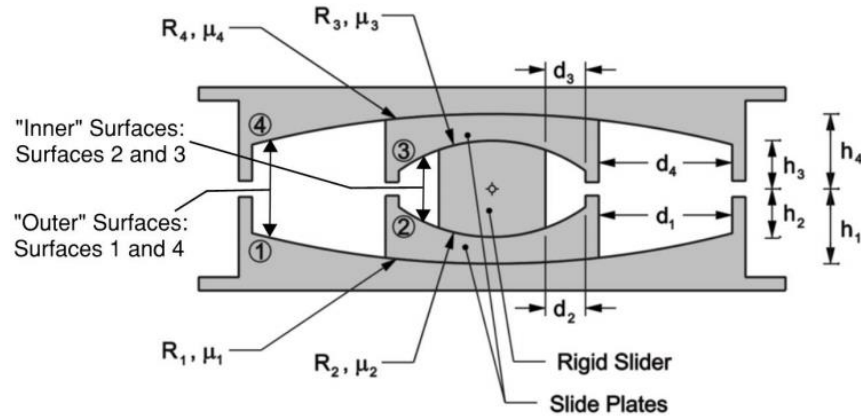


Figura 36. Sección transversal del aislador de péndulo de fricción triple.

Tomado de *Property Modification Factors for Seismic Isolators : Design Guidance for Buildings*.

Technical Report MCEER-15-0005 por McVitty & Constantinou, 2015, New York.

Según Cango P. & Flores S. (2018), las principales ventajas del aislador de péndulo de fricción triple sobre el aislador simple y doble son: la reducción de las dimensiones en planta con la misma capacidad de desplazamiento y la posibilidad de ser diseñador para diferentes niveles de amenaza sísmica debido a su comportamiento adaptativo. Además, reduce la respuesta estructural, lo que mejora el desempeño de los elementos no estructurales (Delgado, Aguiar, & Caiza, 2017).

5.3.1 Modelo físico del aislador de péndulo de fricción triple. El comportamiento del TFP ha sido descrito originalmente por (Morgan, 2007; Fenz & Constantinou, 2008a; Fenz & Constantinou, 2008b; Fenz & Constantinou, 2008c; Fenz & Constantinou, 2008d y Fenz & Constantinou, 2008e). Estos modelos convencionales describen el comportamiento del péndulo de fricción triple suponiendo que la fuerza de contacto resultante actúa en el centro de cada superficie de deslizamiento, además se describe en función de varias fases de movimiento a lo largo de cuatro superficies que dependen de sus parámetros geométricos (R, h, d y μ). En esta sección se describe el modelo convencional y además se presenta el modelo revisado por Sarlis & Constantinou (2016) el cual se basa en que la resulta de las fuerzas de contacto se desarrollan en cualquier punto lejos del centro de la superficie.

Los grados de libertad del aislador según el modelo convencional corresponden al desplazamiento u del aislador y a la rotación de este con respecto a cada superficie. El movimiento relativo del aislador queda totalmente descrito a partir de los ángulos de rotación $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ y θ_4 que se presentan en la Figura 37.

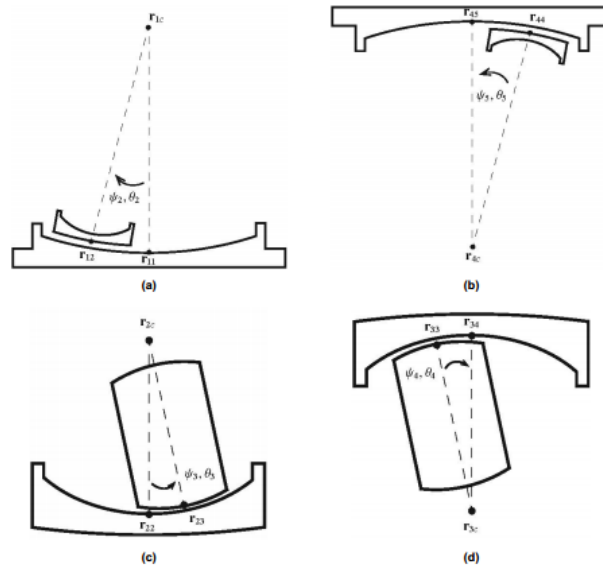


Figura 37. Ángulos de rotación para las cuatro superficies

Tomado de *A Nonlinear Kinetic Model for Multi-Stage Friction Pendulum Systems* por Drazin & Govindjee, 2017, California. The University of California, Berkeley.

En la configuración más general del modelo convencional, donde $R_1 = R_4 \gg R_2 = R_3$, $\mu_2 = \mu_3 < \mu_1 < \mu_4$, el aislador presenta cinco fases de movimiento en donde: (I) el movimiento inicia cuando la fuerza horizontal F sobrepasa la fricción de las superficies interiores 2 y 3, pero es menor a la fricción en las superficies superiores 1 y 4; (II) cuando F es igual a la fricción F_{f1} , el movimiento comienza a través de la superficie 1 y se interrumpe en la superficie 2; (III) cuando F es igual a la fricción F_{f4} , el movimiento comienza a través de la superficie 4 y se interrumpe en la superficie 3; (IV) el movimiento se produce a través de las superficies 2 y 4 cuando se alcanza la capacidad de desplazamiento de la superficie 1, d_1 ; y una fase (V) donde el movimiento se da en las superficies 2 y 3 cuando se alcanza la capacidad de desplazamiento de la superficie 4, d_4 . Las relaciones fuerza-desplazamiento que gobiernan el comportamiento en cada una de estas fases se resumen en la Tabla 6 (Fenz & Constantinou, 2008b)

Tabla 6.
Resumen del comportamiento del aislador triple TFP

Regime	Description	Force-Displacement Relationship	
I	Sliding on surfaces 2 and 3 only	$F = \frac{W}{R_{eff2} + R_{eff3}} u + \frac{F_{f2}R_{eff2} + F_{f3}R_{eff3}}{R_{eff2} + R_{eff3}}$ $\text{Valid until: } F = F_{f1}, \quad u = u^* = (\mu_1 - \mu_2)R_{eff2} + (\mu_1 - \mu_3)R_{eff3}$	
II	Motion stops on surface 2; Sliding on surfaces 1 and 3	$F = \frac{W}{R_{eff1} + R_{eff3}} u + \frac{F_{f1}(R_{eff1} - R_{eff2}) + F_{f2}R_{eff2} + F_{f3}R_{eff3}}{R_{eff1} + R_{eff3}}$ $\text{Valid until: } F = F_{f4}, \quad u = u^* = u^* + (\mu_4 - \mu_1)(R_{eff1} + R_{eff3})$	
III	Motion is stopped on surfaces 2 and 3; Sliding on surfaces 1 and 4	$F = \frac{W}{R_{eff1} + R_{eff4}} u + \frac{F_{f1}(R_{eff1} - R_{eff2}) + F_{f2}R_{eff2} + F_{f3}R_{eff3} + F_{f4}(R_{eff4} - R_{eff3})}{R_{eff1} + R_{eff4}}$ $\text{Valid until: } F = F_{d1} = \frac{W}{R_{eff1}} d_1 + F_{f1}, \quad u = u_{d1} = u^* + d_1 \left(1 + \frac{R_{eff4}}{R_{eff1}} \right) - (\mu_4 - \mu_1)(R_{eff1} + R_{eff4})$	
IV	Slider contacts restrainer on surface 1; Motion remains stopped on surface 3; Sliding on surface 2 and 4	$F = \frac{W}{R_{eff2} + R_{eff4}} (u - u_{d1}) + \frac{W}{R_{eff1}} d_1 + F_{f1}$ $\text{Valid until: } F = F_{d4} = \frac{W}{R_{eff4}} d_4 + F_{f4}, \quad u = u_{d4} = u_{d1} + \left[\left(\frac{d_4}{R_{eff4}} + \mu_4 \right) - \left(\frac{d_1}{R_{eff1}} + \mu_1 \right) \right] (R_{eff2} + R_{eff4})$	
V	Slider bears on restrainer of surface 1 and 4; Sliding on surfaces 2 and 3	$F = \frac{W}{R_{eff2} + R_{eff3}} (u - u_{d4}) + \frac{W}{R_{eff4}} d_4 + F_{f4}$	
Assumptions: (1) $R_{eff1} = R_{eff4} \gg R_{eff2} = R_{eff3}$, (2) $\mu_2 = \mu_3 < \mu_1 < \mu_4$, (3) $d_1 > (\mu_4 - \mu_1)R_{eff1}$, (4), $d_2 > (\mu_1 - \mu_2)R_{eff2}$ (5) $d_3 > (\mu_4 - \mu_3)R_{eff3}$			

Nota: Adaptado de Fenz & Constantinou, 2008a; Cango P. & Flores S., 2018

Para aplicaciones en ingeniería se ha adoptado una configuración estándar que reduce los parámetros a seis geométricos y dos parámetros friccionales, a partir de estos parámetros, el movimiento se reduce a tres fases (McVitty & Constantinou, 2015). Las características de esta configuración son:

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

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

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

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

El detalle del comportamiento mecánico del aislador de péndulo de fricción triple se encuentra en (Fenz & Constantinou, 2008b), a continuación se realiza un resumen con el propósito de entender las fases de su movimiento según el modelo convencional desarrollado por el autor.

5.3.1.1 Fase de movimiento I. Según Fenz & Constantinou (2008a - 2008e), la fase de movimiento I consiste en el deslizamiento simultáneo de las superficies 2 y 3 pero sin presentarse deslizamiento en las superficies 1 y 4 e inicia cuando la fuerza lateral F es igual a F_{f2} y F_{f3} . En la Figura 38(a) se muestra el diagrama de cuerpo libre del aislador durante esta fase. Del equilibrio de fuerzas en la placa interior 2 (FBD III) se tiene que:

$$\begin{aligned} \sum F_x = 0 &\rightarrow F_{f2}\cos\theta_2 + S_2\sin\theta_2 - F_{f1} = 0 \\ \sum F_y = 0 &\rightarrow S_1 + F_{f2}\sin\theta_2 - S_2\cos\theta_2 = 0 \end{aligned} \quad (26)$$

Del equilibrio de fuerzas en la placa exterior 1 (FBD IV) se tiene que $F = F_{f1}$ y $W = S_1$, además, por geometría, el desplazamiento relativo del deslizador en la superficie 2, u_2 es:

$$u_2 = R_{eff2}\sin\theta_2 \quad (27)$$

Combinando las ecuaciones (26) y (27), y considerando que el desplazamiento relativo u_2 es suficientemente pequeño comparado con el radio efectivo R_{eff2} , por lo cual $\cos\theta_2 \approx 1$, la relación fuerza- desplazamiento que gobierna la fase I de movimiento de la superficie 2 y 3 es:

$$F = \frac{W}{R_{eff2}}u_2 + F_{f2} \quad (28)$$

La relación fuerza- desplazamiento para el aislador completo es:

$$F = \frac{W}{2R_{eff2}}u + \mu_2 W \quad (29)$$

Válida hasta un desplazamiento $u^* = 2(\mu_1 - \mu_2)R_{eff2}$

5.3.1.2 Fase de movimiento II. La fase de movimiento II inicia con la transición del deslizamiento en las superficies 2 y 3 al deslizamiento simultáneo en las superficies 1 y 4. Esta fase comienza cuando la fuerza lateral F es igual a F_{f1} y F_{f4} y termina cuando el deslizador hace contacto con el retenedor lateral en las superficies 1 y 4 (McVitty & Constantinou, 2015). En la Figura 38(b) se muestra el diagrama de cuerpo libre del aislador durante esta fase. Del equilibrio de fuerzas se tiene que la relación fuerza - desplazamiento para el aislador completo es:

$$F = \frac{W}{2R_{eff1}}(u - u^*) + \mu_1 W \quad (30)$$

Válida hasta un desplazamiento $u^{**} = u^* + 2d_1^*$, donde $d_1^* = \frac{R_{eff1}}{R_1} d_1$

5.3.1.3 Fase de movimiento III. La fase de movimiento III inicia cuando el movimiento cambia del deslizamiento en las superficies 1 y 4, al deslizamiento simultáneo en las superficies 2 y 3. Este cambio se presenta cuando se alcanza la capacidad de desplazamiento de la superficie 1 y 4. En la Figura 38(c) se muestra el diagrama de cuerpo libre del aislador durante esta fase. Del equilibrio de fuerzas se tiene que la relación fuerza - desplazamiento para el aislador completo es:

$$F = \frac{W}{2R_{eff2}}(u - u^{**}) + \frac{W}{2R_{eff1}}(u^{**} - u^*) + \mu_1 W \quad (31)$$

Válida hasta un desplazamiento $u_{cap} = 2d_1^* + 2d_2^*$, donde $d_1^* = \frac{R_{eff1}}{R_1} d_1$ y $d_2^* = \frac{R_{eff2}}{R_2} d_2$.

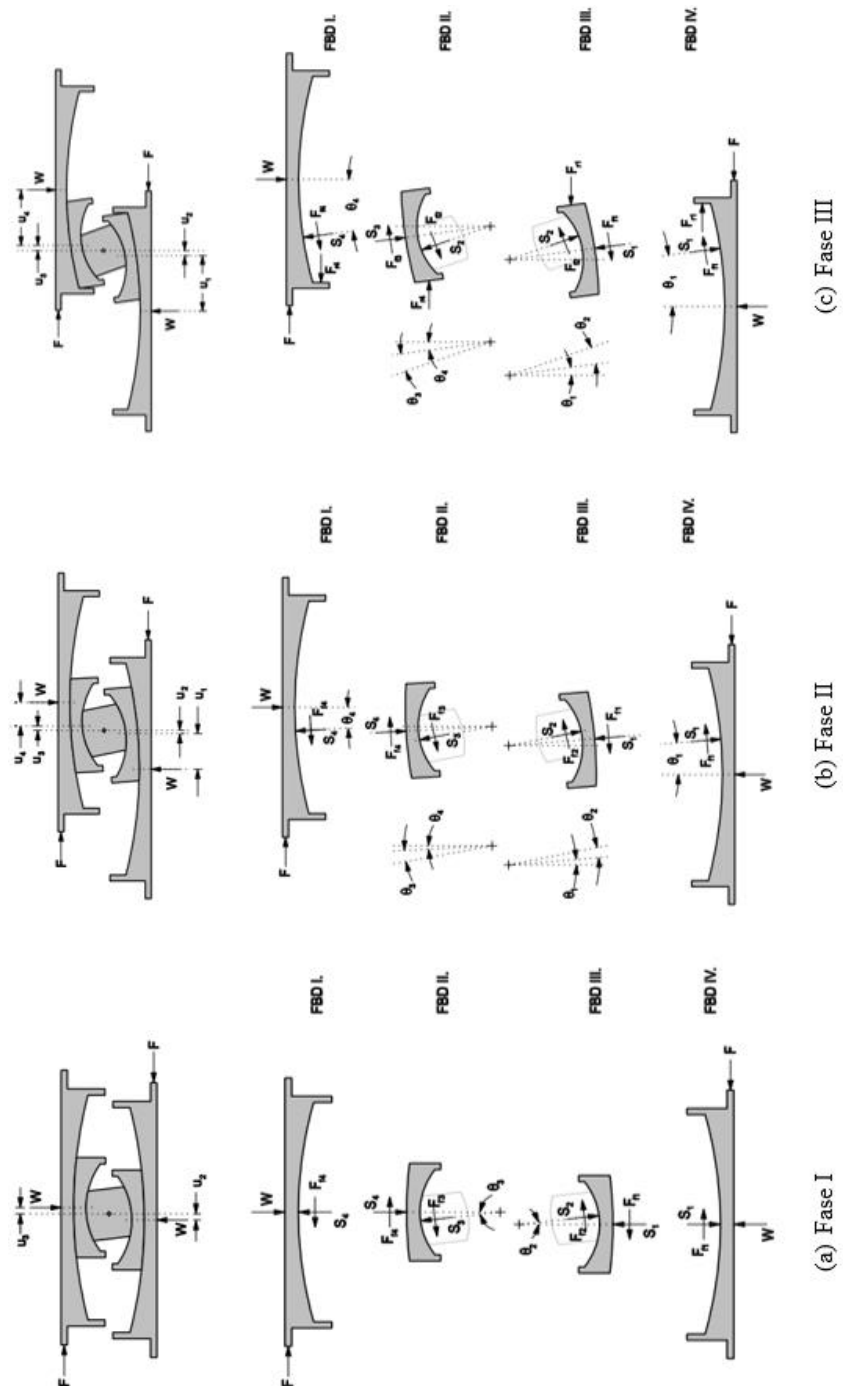


Figura 38. Diagramas de cuerpo libre del aislador TFP

Tomado de *Mechanical Behavior of Multi-Spherical Sliding Bearings. Technical Report MCEE-08-0007* por Fenz & Constantinou, 2008b, New York.

Lo anterior da cuenta que la condición de movimiento del modelo convencional se presenta cuando se supera la fuerza de fricción de cada superficie, pero en la realidad cuando una fuerza lateral es aplicada en la parte superior del aislador, las fuerzas de contacto resultantes se desarrollan en cualquier punto lejos del centro de la superficie donde el equilibrio de momentos se debe satisfacer. Por lo tanto, a diferencia del modelo convencional, se requiere de una fuerza más grande que la fuerza de fricción en la superficie para que el deslizamiento o movimiento se inicie.

Sarlis & Constantinou (2016) presentan un modelo revisado el cual se basa en que la resultante de las fuerzas de contacto se desarrolla en cualquier punto lejos del centro de la superficie, con lo cual la fuerza normal a la superficie presentará una inclinación θ_s con respecto a la vertical y por lo tanto se requiere de la condición de equilibrio de momentos para describir el comportamiento del aislador. Esta condición implica que la fuerza F necesaria para iniciar el deslizamiento sea $\mu W + W\theta_s$, mayor a la propuesta por Fenz & Constantinou (2008a - 2008e) e igual a μW . Realizando el equilibrio de momentos, la fuerza necesaria para iniciar el deslizamiento es:

$$F = \mu \frac{R}{R - h} W \quad (32)$$

La Figura 39 muestra el digrama de cuerpo libre de cada parte del aislador triple, los grados de libertad del aislador según el modelo convencional son: el desplazamiento u del aislador, la rotación de este con respecto a cada superficie θ_i y los ángulos θ_{si} que determinan la ubicación de la fuerza normal. En la Figura 39(a) se muestran las fuerzas de contacto S_i , los ángulos de inclinación de la fuerza normal θ_{si} y los ángulos de deslizamiento de cada componente θ_i ; en la Figura 39(b) se muestran las fuerzas y momentos de inercia, los pesos de cada componente $m_i g$ y las fuerzas de restricción F_{ri} para cada superficie i , los subíndices del peso representan de acuerdo

a sus siglas en inglés: TCP placa cóncava superior, TSP es placa deslizante superior, RS es deslizante rígido y BSP significa placa deslizante inferior. Es importante notar que el diagrama de cuerpo libre de la Figura 39(a) es idéntico al de la Figura 38(a) excepto porque la fuerza resultante en cada superficie actúa en un punto diferente al centro geométrico.

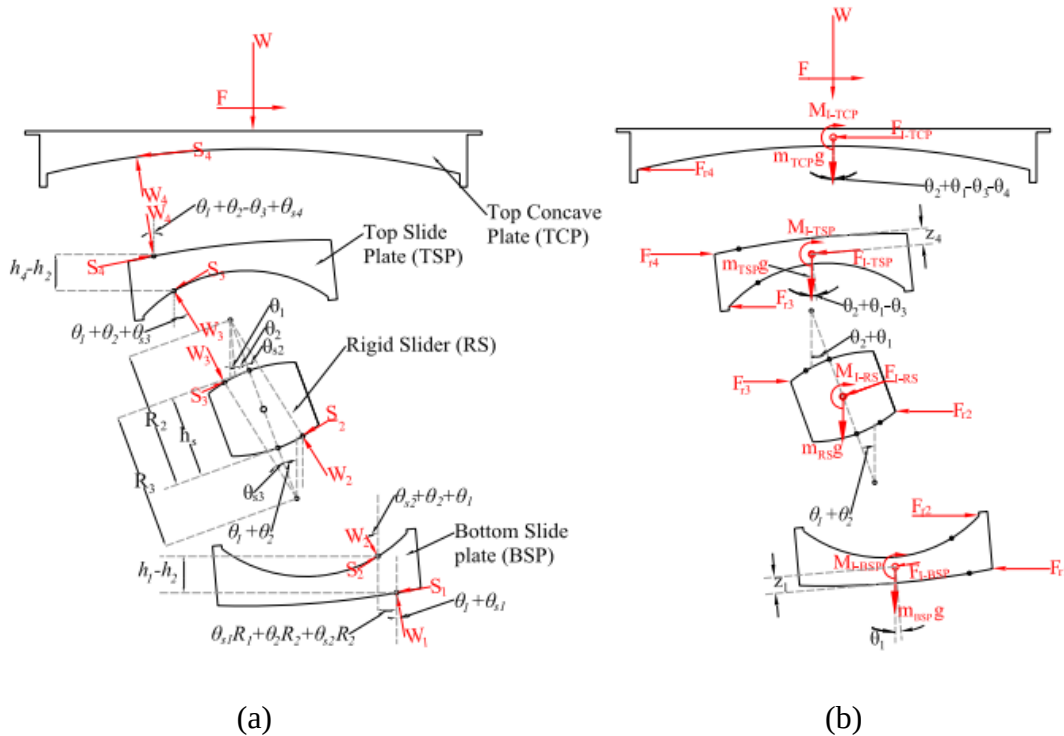


Figura 39. Diagramas de cuerpo libre del TFP

Tomado de “A model of triple friction pendulum bearing for general geometric and frictional parameters” por Sarlis & Constantinou, 2016. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*.

Recuperado de: <https://doi.org/10.1002/eqe>

El modelo propuesto por Sarlis & Constantinou (2016) presenta ventajas con respecto al modelo convencional de Fenz & Constantinou (2008). Estas ventajas corresponden a la posibilidad de considerar los efectos de: levantamiento (uplift) del aislador, placas desalineadas, variaciones de

los coeficientes de fricción debidas a los efectos instantáneos de la temperatura y la velocidad, además, permite analizar configuraciones de las propiedades geométricas y de fricción de las superficies diferentes a la configuración estándar y calcular de manera explícita el desplazamiento y velocidad en cada superficie.

La relación monotónica fuerza-desplazamiento para las cinco fases de movimiento del aislador TFP según el modelo convencional se presenta en la Figura 40. De la curva se puede ver que la rigidez cambia en cada fase, en función de las superficies que intervienen en el movimiento; para las primeras tres fases la rigidez se reduce de manera gradual a medida que el desplazamiento aumenta, y como consecuencia, el periodo de vibración aumenta, para las fases IV y V, se presentan incrementos en la rigidez, los cuales ayudan a reducir los desplazamientos en sismos severos. (Cango P. & Flores S., 2018)

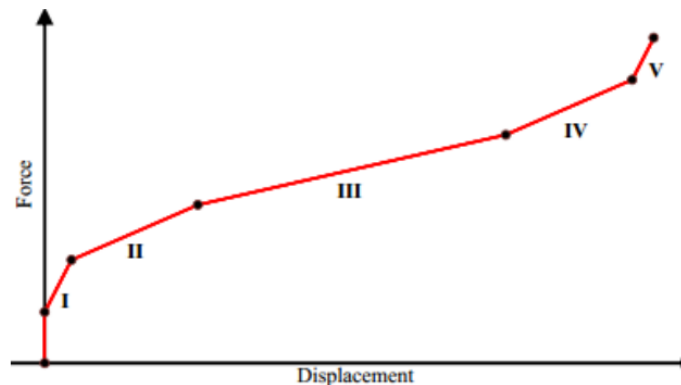


Figura 40. Relación monotónica fuerza-desplazamiento del aislador FPT

Tomado de *Diseño y análisis de edificaciones con aisladores de base tipo FPT* por Cango P. &

Flores S., 2018. Universidad de Cuenca. Recuperado de:

<http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/30283>

Por otro lado, Sarlis & Constantinou (2013) presenta dos configuraciones con ciertas condiciones para las propiedades geométricas y de fricción del aislador TFP, estas condiciones se describen en la Tabla 7. La configuración A es similar a la presentado por Fenz & Constantinou (2008a a 2008e) pero generalizada para permitir que las superficies internas (subíndices 2 y 3) tengan coeficientes de fricción diferentes; la configuración B corresponde al caso en donde las superficies internas tiene coeficientes de fricción mayores a las superficies externas, el modelo convencional no es aplicable a esta condición ya que está restringido para $\mu_2 = \mu_3 < \mu_1 \leq \mu_4$.

Tabla 7.
Configuraciones TFP

Configuración	Coefficientes de fricción
A	$\mu_2 \frac{R_2}{R_{eff2}} < \mu_3 \frac{R_3}{R_{eff3}} < \mu_1 \frac{R_1}{R_{eff1}} < \mu_4 \frac{R_4}{R_{eff4}}$
B	$\mu_1 \frac{R_1}{R_{eff1}} < \mu_4 \frac{R_4}{R_{eff4}} < \mu_2 \frac{R_2}{R_{eff2}} < \mu_3 \frac{R_3}{R_{eff3}}$

Nota: Tomado de *Model of Triple Friction Pendulum Bearing for General Geometric and Frictional Parameters and for Uplift Conditions* por Sarlis & Constantinou, 2013.

El modelo convencional y el modelo revisado proporciona relaciones fuerza desplazamiento idénticas siempre y cuando en el modelo convencional se reemplace los coeficientes de fricción por coeficientes de fricción efectivos dados por las siguientes expresiones:

$$\begin{aligned}
 \bar{\mu}_2 &= \mu_2 \frac{R_2}{R_{eff2}} \\
 \bar{\mu}_1 &= \frac{\mu_1 R_1 - \mu_2 R_2}{R_{eff1} - R_{eff2}} \\
 \bar{\mu}_4 &= \frac{\mu_4 R_4 - \mu_2 R_2}{R_{eff1} - R_{eff2}}
 \end{aligned} \tag{33}$$

Las relaciones fuerza-desplazamiento para la configuración A según los dos modelos se muestran en la Figura 41. La Figura 41(a) determinada según el modelo convencional de Fenz y Constantinou y la Figura 41(b) según el modelo revisado de Sarlis y Constantinou.

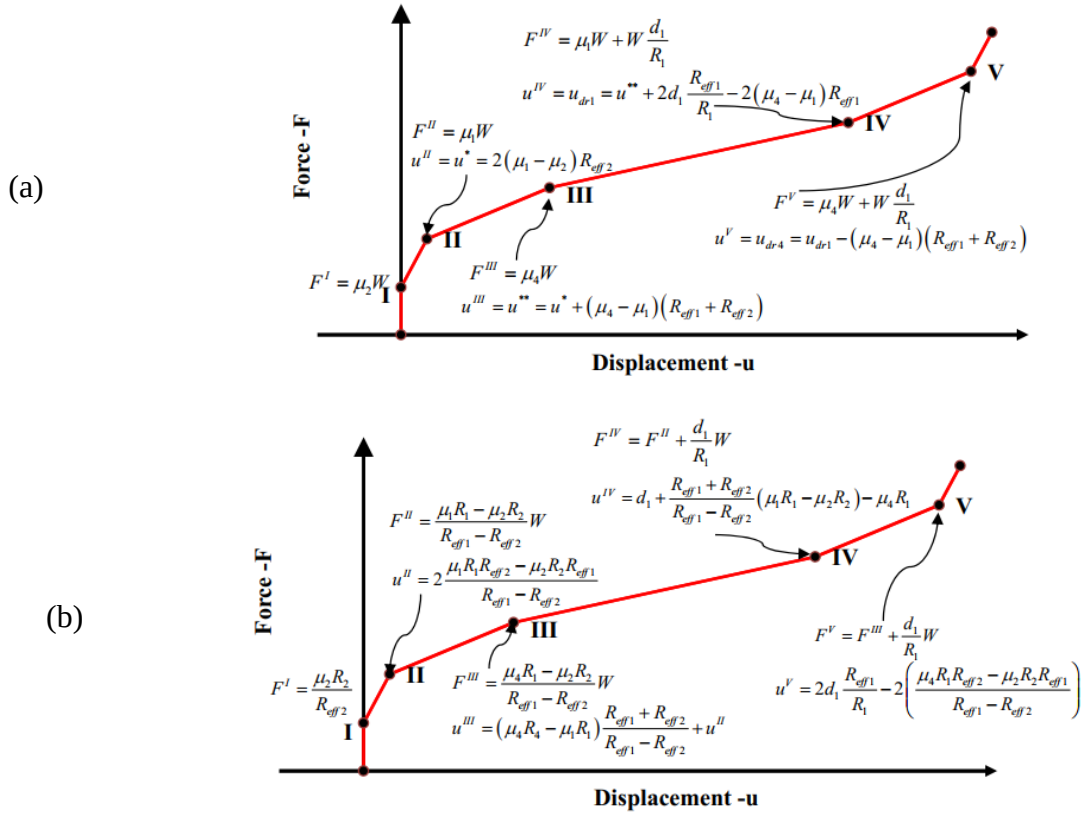


Figura 41. Relación fuerza-desplazamiento del aislador TFP para la configuración A

Tomado de *Model of Triple Friction Pendulum Bearing for General Geometric and Frictional Parameters and for Uplift Conditions* por Sarlis & Constantinou, 2013.

A diferencia de lo anterior, al analizar la configuración B a partir de los dos modelos se presentan diferencias debido a que el modelo convencional no permite capturar la transición entre el punto III y IV, que se presenta en consecuencia a la diferencia en la capacidad de desplazamiento de las superficies 1 y 4. El modelo convencional predice sólo un cambio de rigidez del aislador

cuando la capacidad de desplazamiento de las superficies 1 y 4 (externas) se alcanza simultáneamente. En la Figura 42(a) se muestra la relación fuerza-desplazamiento correspondiente al modelo convencional, y en la Figura 42(b) la relación fuerza-desplazamiento según el modelo revisado.

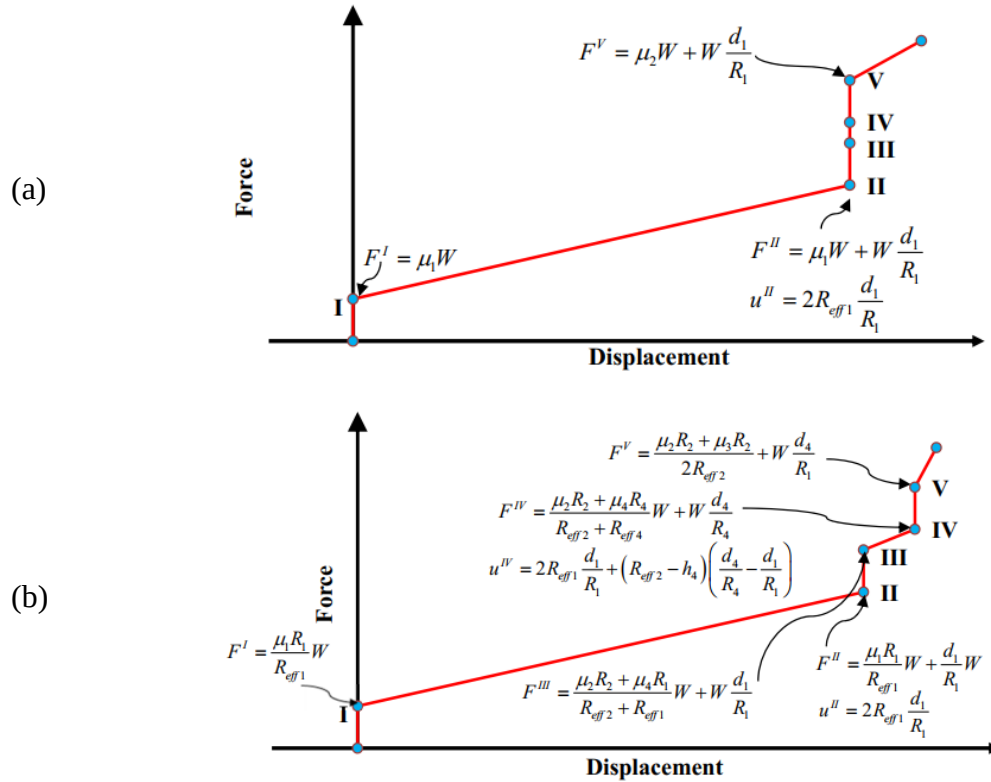


Figura 42. Relación fuerza-desplazamiento del aislador TFP para la configuración B

Tomado de *Model of Triple Friction Pendulum Bearing for General Geometric and Frictional Parameters and for Uplift Conditions* por Sarlis & Constantinou, 2013.

El ciclo de histéresis del aislador para las tres fases de movimiento descritas se muestra en la Figura 43. El modelo descrito por (McVitty & Constantinou, 2015) corresponde a un modelo tri-lineal, mientras que (Delgado et al., 2017) proponen un modelo bilineal para representar las fases

de movimiento I y II , y (Drazin & Govindjee, 2017) propone un modelo no lineal para la representación del ciclo de histéresis del aislador TFP.

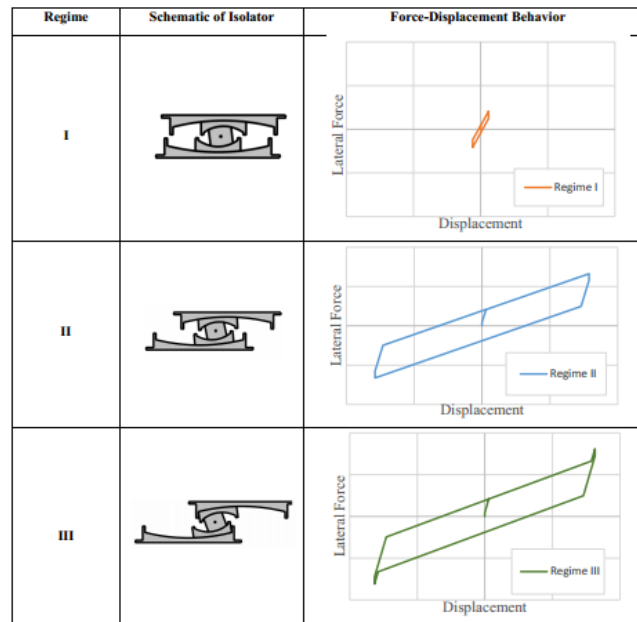


Figura 43.Comportamiento esquemático fuerza-desplazamiento del aislador TFP

Tomado de *Property Modification Factors for Seismic Isolators : Design Guidance for Buildings*.

Technical Report MCEER-15-0005 por Mcvitty & Constantinou, 2015, New York.

5.3.2 Modelo dinámico del aislador de péndulo de fricción triple. El comportamiento del aislador de péndulo de fricción triple puede ser representado a partir de un modelo en paralelo o un modelo en serie. El modelo en paralelo se usa para el caso particular en donde $R_{eff1} = R_{eff4}$, $R_{eff2} = R_{eff3}$, $d_1 = d_4$, $d_2 = d_3$, $\mu_2 = \mu_3$ y $\mu_1 = \mu_4$, pero sólo puede representar las dos primeras fases de movimiento. Por otro lado, el modelo en serie, permite representar el comportamiento multi-fases del aislador (Cango P. & Flores S., 2018).

En el modelo en serie, el aislador de triple péndulo de fricción puede ser modelado a partir de tres péndulos de fricción simple conectados en serie. Cada uno de los tres aisladores están conectados para tener la misma fuerza, pero desplazamientos relativos independientes. En este modelo, el primer aislador simple representa el comportamiento combinado de las superficies internas 2 y 3, el segundo aislador representa el comportamiento de la superficie 1 y el tercer aislador representa la superficie 4. Cada aislador simple consiste en un arreglo paralelo de (a) un resorte lineal elástico de rigidez $1/\bar{R}_{effi}$, que representa la fuerza de restitución debido a la curvatura de la superficie, (b) un elemento de fricción con coeficiente de fricción $\bar{\mu}_i$, dependiente de la velocidad y (c) un elemento que representa la capacidad de desplazamiento de cada superficie, $\bar{d}_i$ (Fenz & Constantinou, 2008a).

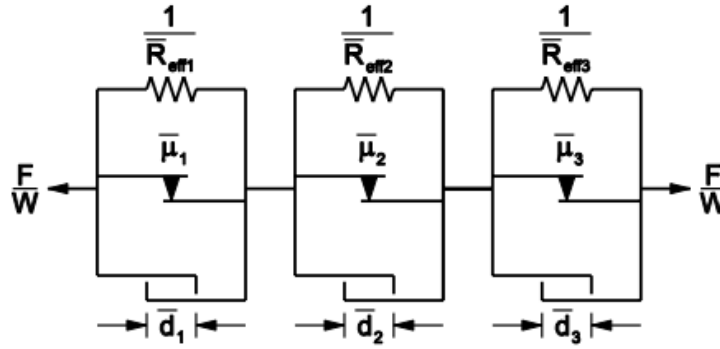


Figura 44. Modelo matemático de un aislador TFP

Tomado de Development, implementation and verification of dynamic analysis models for multi-spherical sliding bearings : Technical Report MCEER-08-0018 por Fenz & Constantinou, 2008a.

Según (Fenz & Constantinou, 2008a), los parámetros de entrada de los aisladores simples que componen el modelo en serie deben ser modificados para representar el comportamiento del aislador triple. Las modificaciones que se deben realizar a los parámetros se resumen en la Tabla 8:

Tabla 8.
Parámetros del modelo en serie del triple péndulo de fricción

Element	Coefficients of Friction	Radii of Curvature	Displacement Capacity (Nominal)	Rate Parameter
1	$\bar{\mu}_1 = \mu_2 = \mu_3$	$\bar{R}_{eff1} = R_{eff2} + R_{eff3}$	$\bar{d}_1 = d_{tot}^1 - (\bar{d}_2 + \bar{d}_3)$	$\bar{a}_1 = \frac{1}{2} \frac{(a_2 + a_3)}{2}$
2	$\bar{\mu}_2 = \mu_1$	$\bar{R}_{eff2} = R_{eff1} - R_{eff2}$	$\bar{d}_2 = \frac{R_{eff1} - R_{eff2}}{R_{eff1}} d_1$	$\bar{a}_2 = \frac{R_{eff1}}{R_{eff1} - R_{eff2}} a_1$
3	$\bar{\mu}_3 = \mu_4$	$\bar{R}_{eff3} = R_{eff4} - R_{eff3}$	$\bar{d}_3 = \frac{R_{eff4} - R_{eff3}}{R_{eff4}} d_4$	$\bar{a}_3 = \frac{R_{eff4}}{R_{eff4} - R_{eff3}} a_4$

1. d_{tot} is the total displacement capacity of the actual bearing. Alternatively, parameter d_{tot} may be left unspecified (infinite displacement capacity)

Nota: Tomado de Development, implementation and verification of dynamic analysis models for multi-spherical sliding bearings : Technical Report MCEER-08-0018 por Fenz & Constantinou, 2008a.

Según (Dhankot & Soni, 2017), el comportamiento dinámico de una estructura de N pisos, montada sobre aisladores TFP puede ser descrito por la siguiente ecuación:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = [M]\{r\}(\ddot{u}_b + \ddot{u}_g) \quad (34)$$

Donde $[M]$, $[C]$ y $[K]$ son las matrices de masa, amortiguamiento y rigidez de la superestructura, respectivamente, de tamaño $N \times N$; $\{u\} = \{u_1, u_2, \dots, u_N\}^T$ es el vector de desplazamiento relativo de la superestructura; $u_i (i = 1, 2, \dots, N)$ es el desplazamiento lateral del piso i relativo a la base; $\{r\} = \{1, 1, \dots, 1\}^T$ es el vector de coeficientes de influencia; $\ddot{u}_b$ es la aceleración de la masa de base relativa al suelo y $\ddot{u}_g$ es la aceleración del suelo debida al sismo.

Adicionalmente, las ecuaciones que gobiernan el movimiento del aislador y la masa de base son:

$$m_b(\ddot{u}_b + \ddot{u}_g) = k_{b1}x_1 + F_1 + F_{d1} - c_1\dot{u}_1 - k_1u_1 = 0 \quad (35)$$

$$m_{s1}(\ddot{u}_{s1} + \ddot{u}_g) - k_{b1}x_1 + k_{b2}x_2 + F_2 + F_{d2} - F_1 - F_{d1} = 0 \quad (36)$$

$$m_{s2}(\ddot{u}_{s2} + \ddot{u}_g) - k_{b3}x_3 - k_{b2}x_2 + F_3 + F_{d3} - F_2 - F_{d2} = 0 \quad (37)$$

Donde m_{s1} , m_{s2} son las masas de los nodos que conectan los tres aisladores simples del modelo en serie (FP₁-FP₂ y FP₂-FP₃); u_{s1} y u_{s2} son los desplazamientos relativos al suelo de de estas masas; $x_1 = u_b - u_{s1}$, ; $x_2 = u_{s1} - u_{s2}$ y ; $x_3 = u_{s3}$ corresponden al deslizamiento relativo de cada aislador simple, FP₁, FP₂ y FP₃, respectivamente y F_1 , F_2 y F_3 son las fuerzas de fricción de cada elemento.

Bajo ciertas condiciones los aisladores sísmicos pueden presentar comportamientos indeseados como fuerzas de tensión o levantamiento lo que podría conllevar a inestabilidad del sistema aislador-estructura. Este comportamiento se puede presentar por la magnitud de la componente vertical de la demanda y del nivel de excitación sísmica (Loghman & Khoshnoudian, 2013; Okazaki, Sato, Ryan, Sasaki, & Mahin, 2014), en estructuras esbeltas con menos de tres filas de

aisladores, en aisladores debajo de columnas arriostradas o en aisladores debajo de muros de cortante (Panayiotis Roussis, 2009). El levantamiento del aislador se puede representar a partir de tres estados que se muestran en la Figura 45, allí se representa la historia de desplazamiento horizontal y vertical del aislador durante un evento sísmico.

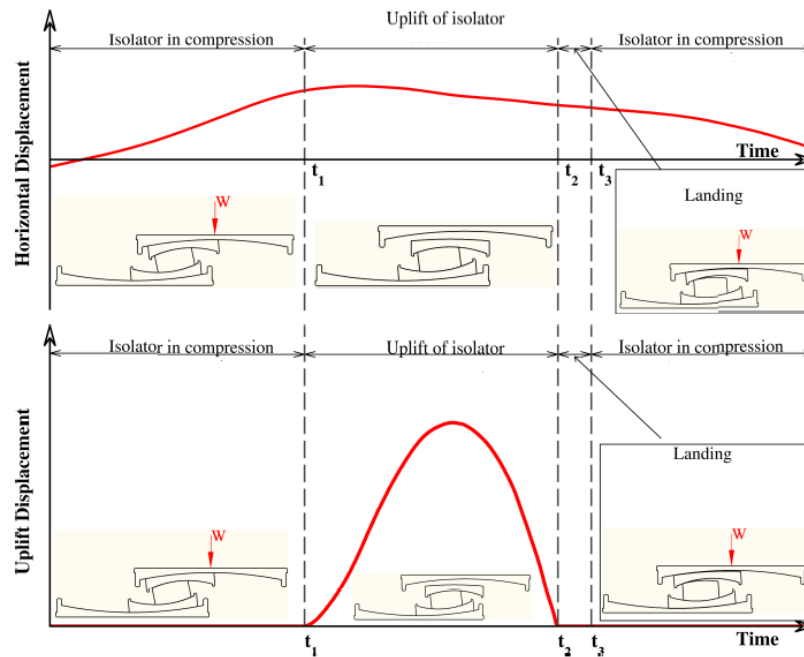


Figura 45. Etapas de levantamiento del aislador TFP

Tomado de *Model of Triple Friction Pendulum Bearing for General Geometric and Frictional Parameters and for Uplift Conditions* por Sarlis & Constantinou, 2013.

Según Sarlis & Constantinou (2013) y Raftoyiannis & Michaltsos (2017) en condiciones regulares de operación del aislador TFP, las fuerzas de inercia pueden ser despreciadas, ya que su efecto es insignificante en comparación con la fuerza restauradora y de fricción. Sin embargo, ante condiciones de levantamiento o de carga axial pequeña, la carga de gravedad tiende a cero y no considerar las fuerzas de inercia puede conllevar a errores en la respuesta. El modelamiento del

efecto de levantamiento se debe hacer a partir del análisis de la respuesta dinámica de cada componente interno del aislador, incluyendo los efectos de las fuerzas de inercia y la rigidez de la junta de goma.

Adicionalmente, Raftoyiannis & Michaltsos (2017) exponen que la influencia de las fuerzas de inercia verticales en la respuesta estructural es despreciable para el caso de un movimiento de tierra a larga distancia, mientras que se vuelve significativo para un movimiento de tierra cercano a la fuente sísmica, incluso para valores pequeños de radio del aislador. Hall, Heaton, Halling, & Wald (1995) y Heaton, Hall, Wald, & Halling (1995) han evaluado la vulnerabilidad de los edificios aislados ante movimientos del terreno cercanos a la falla, especialmente aquellos de naturaleza parecida a un pulso. Con relación a la respuesta sísmica de estos edificios se ha encontrado que el desplazamiento en el aislador puede duplicarse ante sismos tipo pulso (Amiri, Namiranian, & Amiri, 2016).

Los aisladores se diseñan para cierto rango de movimientos sísmicos, ante los cuales el sistema de aislamiento provee una mejora en el comportamiento de la estructura reduciendo aceleraciones y desplazamientos. Sin embargo, los movimientos para los cuales fue diseñado pueden superarse en algún momento de su ciclo de vida, por lo cual es necesario tener en cuenta el comportamiento del aislador de péndulo triple ante movimientos del terreno extremos e impredecibles. Autores como Sarlis, Constantinou, & Reinhorn (2013) y Becker, Bao, & Mahin (2017) han llevado a cabo ensayos dinámicos sometiendo los aisladores de péndulo de fricción triple hasta los niveles máximos de sismos considerados en el diseño e incluso hasta la capacidad máxima del sistema de aislamiento. Por otro lado, Raftoyiannis & Michaltsos (2017) han llevado a cabo ensayos dinámicos sometiendo la estructura a niveles de excitación sísmica más altos de los esperados en

el diseño, en donde se evidencia la complejidad del comportamiento del aislador, pues cada aislador exhibe un comportamiento único posterior al fallo.

5.4 Aisladores de Péndulo de Fricción Quintuple (QTFP)

El aislador de péndulo de fricción quintuple (QTFP, por sus siglas en inglés) es una nueva generación de aisladores de base tipo péndulo de fricción, postulada por Tsai, Su, & Chiang (2014) y desarrollada por Lee & Constantinou (2015). Por ser un aislador reciente, las investigaciones sobre su comportamiento aún se encuentran en desarrollo y son escasas. El QTFP es una extensión del péndulo de fricción triple y se compone de seis superficies cóncavas deslizantes, y cinco péndulos efectivos. Debido a estas múltiples superficies, el comportamiento del QFP es altamente adaptativo ante diferentes niveles de amenaza sísmica (Sodha, Soni, Desai, & Kumar, 2017).

La Figura 46 presenta la sección transversal del aislador QFP, los parámetros técnicos que definen su comportamiento son: parámetros geométricos como radio de curvatura de cada una de las seis superficies R_i , $i = 1$ a 6 ; altura a cada componente h_i , $i = 1$ a 6 ; capacidad de desplazamiento nominal de cada superficie d_i , $i = 1$ a 6 ; y parámetros mecánicos correspondientes a los coeficientes de fricción de cada una de las seis superficies μ_i , $i = 1$ a 6 .

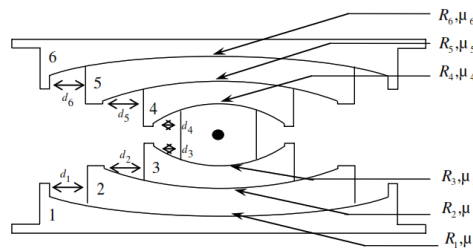


Figura 46. Sección transversal del péndulo de fricción quintuple

Tomado de “Behavior of Quintuple Friction Pendulum System Under Near-Fault Earthquakes”

por Sodha et al., 2017. *Journal of Earthquake and Tsunami*, 11(05).

5.4.1 Modelo físico del aislador de péndulo de fricción quíntuple. Según Lee & Constantinou (2015), el aislador QTFP presenta dos configuraciones en función de los valores de los coeficientes de fricción:

a. Configuración I $\rightarrow \mu_3 = \mu_4 < \mu_5 \leq \mu_2 < \mu_6 \leq \mu_1$

b. Configuración II $\rightarrow \mu_3 = \mu_4 < \mu_2 \leq \mu_5 < \mu_6 \leq \mu_1$

Cada una de estas condiciones está caracterizada por nueve fases de movimiento, en la **¡Error!** **No se encuentra el origen de la referencia.** se presenta la formulación de las relaciones fuerza-desplazamiento para cada fase de movimiento y para cada configuración. Se observa que, en función de los coeficientes de fricción, algunas fases de movimiento coinciden en las dos configuraciones. Adicionalmente, en la Figura 47 se presentan las deformadas del aislador en las nueve fases de movimiento, para la configuración I.

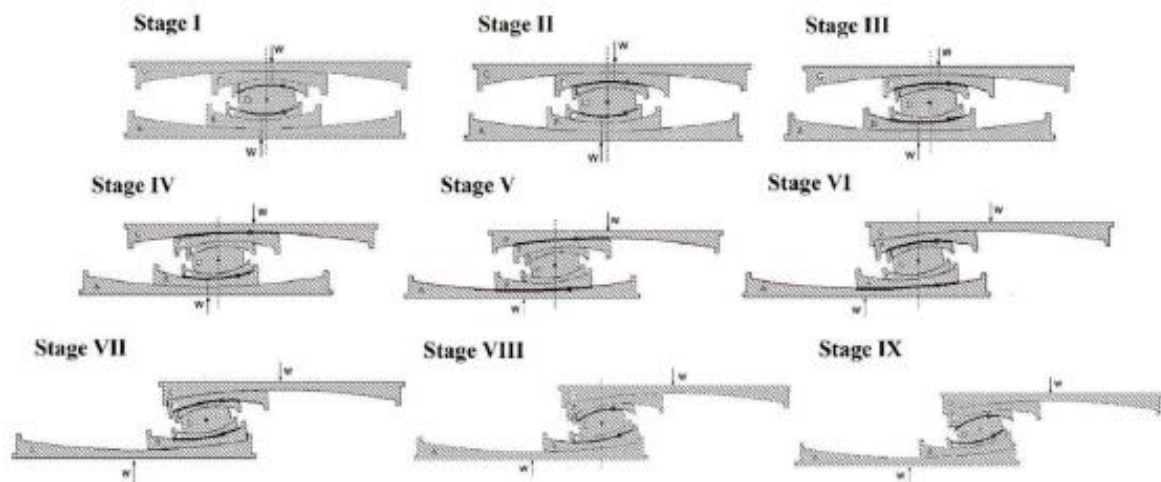


Figura 47. Fases de movimiento del QTFP

Tomado de “Seismic Performance Assessment of Quintuple Friction Pendulum Isolator with a Focus on Frictional Behavior Impressionability from Velocity and Temperature” por Keikha & Ghodrati

Amiri, 2019. *Journal of Earthquake Engineering*, 1–31. Recuperado de:
<https://doi.org/10.1080/13632469.2019.1568929>

Tabla 9.

Resumen del comportamiento del aislador QTFP

Fase de movimiento		Conf. I	Conf. II	Relación Fuerza-Desplazamiento	
				Configuración I	Configuración II
I	Se inicia	Movimiento inicia en superficies 3 y 4		$F = \frac{W}{R_{eff\,3} + R_{eff\,4}} u + \frac{F_{f3} R_{eff\,3} + F_{f4} R_{eff\,4}}{R_{eff\,3} + R_{eff\,4}}$	
	Movimiento o Simultáneo	Ocurre en las superficies 3 y 4			
II	Se inicia	Sup.5	Sup.2	$F = \frac{W}{R_{eff\,3} + R_{eff\,5}} u + \frac{F_{f3} R_{eff\,3} + F_{f4} R_{eff\,4} + F_{f5} (R_{eff\,5} - R_{eff\,4})}{R_{eff\,3} + R_{eff\,5}}$	
	Movimiento o Simultáneo	Sup. 3 y 5	Sup. 2 y 4		
	Se detiene	Sup.4	Sup.3	$F = \frac{W}{R_{eff\,2} + R_{eff\,4}} u + \frac{F_{f3} R_{eff\,3} + F_{f4} R_{eff\,4} + F_{f5} (R_{eff\,5} - R_{eff\,4})}{R_{eff\,2} + R_{eff\,4}}$	
	Se inicia	Sup.2	Sup.5		
III	Movimiento o Simultáneo	Ocurre en las superficies 2 y 5		$F = \frac{W}{R_{eff\,2} + R_{eff\,5}} u + \frac{F_{f2} (R_{eff\,2} - R_{eff\,3}) + F_{f3} R_{eff\,3} + F_{f4} R_{eff\,4} + F_{f5} (R_{eff\,5} - R_{eff\,4})}{R_{eff\,2} + R_{eff\,5}}$	
	Se detiene	Sup.3	Sup.4		
IV	Se inicia	Sup.6		$F = \frac{W}{R_{eff\,2} + R_{eff\,6}} u + \frac{F_{f2} (R_{eff\,2} - R_{eff\,3}) + F_{f3} R_{eff\,3} + F_{f4} R_{eff\,4} + F_{f5} (R_{eff\,5} - R_{eff\,4}) + F_{f6} (R_{eff\,6} - R_{eff\,5})}{R_{eff\,2} + R_{eff\,6}}$	
	Movimiento o Simultáneo	Ocurre en las superficies 2 y 6			
	Se detiene	Sup.5		$F = \frac{W}{R_{eff\,1} + R_{eff\,6}} u + \frac{F_{f1} (R_{eff\,1} - R_{eff\,2}) + F_{f2} (R_{eff\,2} - R_{eff\,3}) + F_{f3} R_{eff\,3} + F_{f4} R_{eff\,4} + F_{f5} (R_{eff\,5} - R_{eff\,4}) + F_{f6} (R_{eff\,6} - R_{eff\,5})}{R_{eff\,1} + R_{eff\,6}}$	
	Se inicia	Sup.1			
V	Movimiento o Simultáneo	Ocurre en las superficies 1 y 6		$F = \frac{W}{R_{eff\,1} + R_{eff\,6}} u + \frac{F_{f1} (R_{eff\,1} - R_{eff\,2}) + F_{f2} (R_{eff\,2} - R_{eff\,3}) + F_{f3} R_{eff\,3} + F_{f4} R_{eff\,4} + F_{f5} (R_{eff\,5} - R_{eff\,4}) + F_{f6} (R_{eff\,6} - R_{eff\,5})}{R_{eff\,1} + R_{eff\,6}}$	
	Se detiene	Sup.2			
VI	Se inicia	Sup.5		$F = \frac{W}{R_{eff\,1} + R_{eff\,5}} (u - u_{dr6}) + F_{dr6}$	
	Movimiento o Simultáneo	Ocurre en las superficies 1 y 5			
	Se detiene	Sup.6, alcanzando su máximo desplazamiento		$F = \frac{W}{R_{eff\,2} + R_{eff\,5}} (u - u_{dr1}) + F_{dr1}$	
	Se inicia	Sup.2			
VII	Movimiento o Simultáneo	Ocurre en las superficies 2 y 5		$F = \frac{W}{R_{eff\,2} + R_{eff\,5}} (u - u_{dr1}) + F_{dr1}$	
	Se detiene	Sup.1, alcanzando su máximo desplazamiento			
VII I	Se inicia	Sup.4	Sup.3	$F = \frac{W}{R_{eff\,2} + R_{eff\,4}} (u - u_{dr5}) + F_{dr5}$	$F = \frac{W}{R_{eff\,3} + R_{eff\,5}} (u - u_{dr2}) + F_{dr2}$

Movimiento o Simultáneo		Sup. 2 y 4	Sup. 3 y 5
Tabla 9. (Continuación)			
IX	Se detiene	Sup.5, alcanzando su máximo desplazamiento o	Sup.2, alcanzando su máximo o desplazamiento o
	Se inicia	Sup.3	Sup.4
	Movimiento o Simultáneo	Ocurre en las superficies 3 y 4	
IX	Se detiene	Sup.2, alcanzando su máximo desplazamiento o	Sup.5, alcanzando su máximo o desplazamiento o
			$F = \frac{W}{R_{eff3} + R_{eff4}}(u - u_{dr2}) + F_{dr2}$
			$F = \frac{W}{R_{eff3} + R_{eff4}}(u - u_{dr5}) + F_{dr5}$

Nota: Adaptado de *Quintuple Friction Pendulum Isolator Behavior, Modeling and Validation. Technical Report MCEER-15-0007* por Lee & Constantinou, 2015.

5.4.2 Modelo dinámico del aislador de péndulo de fricción quintuple. El comportamiento del aislador de péndulo de fricción quintuple puede ser representado a partir de cinco péndulos simples conectados en serie (Figura 48) o partir de la combinación de un péndulo de fricción cóncavo doble y un péndulo de fricción triple (Figura 49). Cada aislador simple se caracteriza por (a) un resorte lineal elástico de rigidez $W/\bar{R}_{effi}$, que representa la fuerza de restitución debido a la curvatura de la superficie, donde W es la fuerza axial en el aislador (b) la fuerza de fricción $\bar{\mu}W$ con coeficiente de fricción $\bar{\mu}_i$, dependiente de la velocidad y (c) un elemento que representa la capacidad de desplazamiento de cada superficie, $\bar{d}_i$ (Lee & Constantinou, 2015).

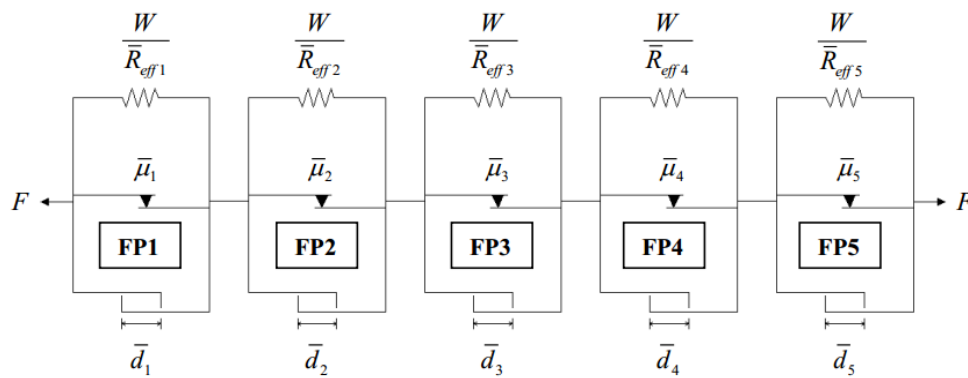


Figura 48. Modelo en serie del aislador QTFP

Nota: Adaptado de *Quintuple Friction Pendulum Isolator Behavior, Modeling and Validation. Technical Report MCEER-15-0007* por Lee & Constantinou, 2015.

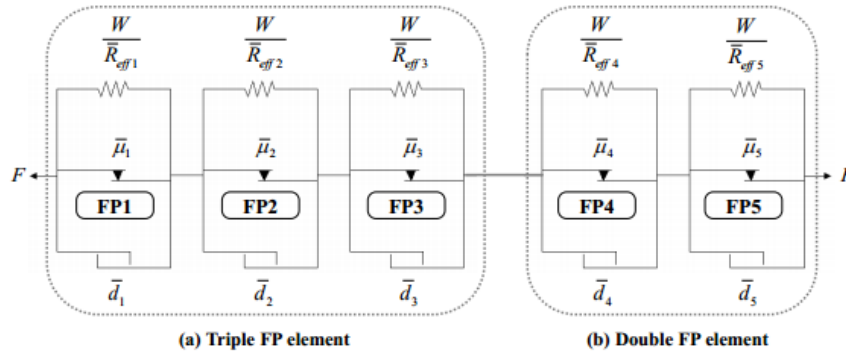


Figura 49. Modelo en paralelo del aislador QTFP

Nota: Adaptado de *Quintuple Friction Pendulum Isolator Behavior, Modeling and Validation. Technical Report MCEER-15-0007* por Lee & Constantinou, 2015.

Según Sodha, Vasanwala, & Soni (2018), el comportamiento dinámico de una estructura de N pisos, montada sobre aisladores QTFP puede ser descrito por la siguiente ecuación:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = [M]\{r\}(\ddot{u}_b + \ddot{u}_g) \quad (38)$$

Donde $[M]$, $[C]$ y $[K]$ son matrices cuadradas de masa, amortiguamiento y rigidez de la superestructura, respectivamente; $\{u\} = \{u_1, u_2, \dots, u_N\}^T$ es el vector de desplazamiento relativo de la superestructura; u_i ($i = 1, 2, \dots, N$) es el desplazamiento lateral del piso i relativo a la base; $\{r\} = \{1, 1, \dots, 1\}^T$ es el vector de coeficientes de influencia; $\ddot{u}_b$ es la aceleración de la masa de base relativa al suelo y $\ddot{u}_g$ es la aceleración del suelo debida al sismo.

Pocas investigaciones se han publicado en relación a este tipo de aislador, debido a que ha sido desarrollado recientemente. En esta sección se han presentando los avances en el estudio de su comportamiento hasta la fecha de realización de este documento.

5.5 Principales ventajas y desventajas

El mecanismo de operación de un aislador de péndulo de fricción consiste en aumentar el periodo fundamental de la estructura mas allá de los periodos predominantes del movimiento del suelo (Amiri et al., 2016), haciendo que esta se deslice a lo largo de la superficie cóncava del dispositivo de aislamiento. De manera general, este mecanismo reduce las fuerzas transmitidas a la estructura, reduce la aceleración lateral, aumenta el amortiguamiento del sistema (Kravchuk, Colquhoun, & Porbaha, 2008) y protege los componentes estructurales y no estructurales ante daños producidos por movimientos del terreno fuertes. Adicionalmente, el sistema de péndulo de fricción tiene un efecto importante en la reducción de la respuesta torsional en estructuras asimétricas, esto es porque la fuerza friccional en estos dispositivos es proporcional a la fuerza axial debida al peso de la estructura. Por esta razón, el centro de gravedad de la superestructura coincide con el centro de rigidez del sistema de aislamiento (Satish Nagarajaiah & Sun, 2001; Wu & Samail, 2002; Manarbek, 2012; (Kassem, Elkhoreby, & Seleemah, 2015).

La principal desventaja de este tipo de aisladores es que la respuesta friccional del aislador se ve afectada por la temperatura en las superficies deslizantes (Gandelli, Quaglini, Dubini, Bocciarelli, & Poggi, 2013; Quaglini, Bocciarelli, Gandelli, & Dubini, 2014; Furinghetti, Pavese, Quaglini, & Dubini, 2019). La razón obedece a que el coeficiente de fricción de los materiales deslizantes termoplásticos disminuye a medida que la temperatura ambiente aumenta. Además del ambiente, la temperatura de las superficies también es influenciada por un mecanismo de autocalentamiento asociado con la disipación de energía que ocurre a altas velocidades (Constantinou, Whittaker, Kalpakidis, Fenz, & Warn, 2006) y por el número de ciclos a los que es sometido el aislador (Mosqueda, Whittaker, & Fenves, 2004), efecto que se intensifica cuando el movimiento ocurre a altas frecuencias. Es por esta razón que actualmente las investigaciones

apuntan al estudio de la degradación de fricción y el aumento de la temperatura como dos mecanismos interconectados a partir de un análisis termo-mecánico acoplado (De Domenico, Ricciardi, & Benzoni, 2018; Keikha & Ghodrati Amiri, 2019). Por el contrario, en regiones expuestas a temperaturas frías extremas, se recomienda el uso de aisladores de péndulo de fricción sobre otro tipo de aisladores sísmicos, porque estos mantienen su rigidez y amortiguamiento de diseño en estas temperaturas (Sodha et al., 2017).

En relación a las propiedades dinámicas, el periodo fundamental de una estructura aislada se vuelve independiente de la masa de la superestructura y comienza a depender sólo del radio de la superficie del aislador. En la práctica no se trabaja con periodos aislados de más de 3 segundos, puesto que resultaría en dispositivos grandes y poco efectivos. Por esta razón los dispositivos de péndulo de fricción no son efectivos para estructuras flexibles (Loghman & Khoshnoudian, 2013).

Las principales diferencias entre los tipos de aisladores de péndulo de fricción son su capacidad de desplazamiento y respuesta ante diferentes demandas de la estructura. Para resistir movimientos de tierra muy raros, los dispositivos de aislamiento se diseñan frecuentemente con una resistencia o amortiguamiento significativos, y como resultado, estos dispositivos proporcionan un efecto de aislamiento reducido para eventos sísmicos más frecuentes (Morgan & Mahin, 2011). El péndulo simple mantiene constante la fricción, la rigidez lateral y el periodo de deslizamiento para todos los movimientos y desplazamientos, es decir, no presenta un comportamiento adaptativo ante movimientos distintos al máximo sismo creíble (Barbas, Matusewitch, & Williams, n.d.; Malekzadeh & Taghikhany, 2010).

Por el contrario, el péndulo de fricción doble tiene la habilidad progresiva de exhibir diferentes propiedades histeréticas a diferentes etapas de la respuesta a desplazamiento (Malekzadeh & Taghikhany, 2010) y en relación a la capacidad de desplazamiento, el aislador de péndulo de

fricción doble (DCFP) permite alcanzar dos veces el desplazamiento máximo de un aislador de péndulo de fricción simple (FPS) de las mismas dimensiones en planta (Ponzo et al., 2015).

En el mismo sentido, el péndulo de fricción triple presenta un comportamiento adaptativo mejorado en comparación con el péndulo de fricción simple y doble (Dhankot & Soni, 2017). Este está compuesto por tres mecanismos de deslizamiento, el primer mecanismo está orientado a la protección del contenido de la estructura, el segundo mecanismo o péndulo está orientado a la protección de los componentes no estructurales y el tercer péndulo a la protección de la estructura. Según Cango P. & Flores S. (2018), las principales ventajas del aislador de péndulo de fricción triple sobre el aislador simple y doble son: la reducción de las dimensiones en planta con la misma capacidad de desplazamiento y la posibilidad de ser diseñador para diferentes niveles de amenaza sísmica debido a su comportamiento adaptativo. Además, reduce la respuesta estructural, lo que mejora el desempeño de los elementos no estructurales (Delgado et al., 2017).

Con respecto al aislador de péndulo de fricción quíntuple, su principal ventaja es su comportamiento adaptativo, mejorado en comparación con el péndulo de fricción triple, pues gracias a las múltiples superficies deslizantes este aislador tiene un buen desempeño ante varios niveles de amenaza sísmica (Lee & Constantinou, 2015). Según Keikha & Ghodrati Amiri (2019), las últimas tres fases de movimiento se comportan con rigidez y fricción muy alta, para minimizar los desplazamientos del aislador que ocurren durante sismos de intensidad severa. Esta característica optimiza el diseño de aislador, reduciendo su tamaño y costo. Adicionalmente, con el aumento en el periodo y amortiguamiento del QTFP, el desplazamiento del aislador aumenta y las aceleraciones absolutas de piso y cortante basal disminuyen, por lo tanto las fuerzas de diseño en la estructura son menores (Sodha et al., 2017).

Con relación a los sismos cercanos a la falla y debido a que el aislador de péndulo simple tiene un periodo constante, pueden presentarse casos de resonancia de la estructura aislada, si el periodo predominante del movimiento del terreno cercano a la falla se encuentra cerca al periodo de la estructura aislada (Jangid, 2005). Este tipo de sismos a su vez son de tipo pulso, lo que significa que la componente vertical del sismo debe considerarse en el diseño, en función de la magnitud de esta componente se puede presentar levantamiento o tensión en los aisladores en estructuras esbeltas, en aisladores debajo de columnas arriostradas o en aisladores debajo de muros de cortante. En comparación con el péndulo simple y doble, el aislador de péndulo triple es capaz de acomodarse ante el levantamiento de sus componentes (Panayiotis Roussis, 2009) y (Sarlis & Constantinou, 2013). Las principales ventajas y desventajas de los tipos de péndulo de fricción se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 10.
Ventajas y desventajas del aislador tipo péndulo de fricción.

Parámetro	Péndulo de fricción simple	Péndulo de fricción doble	Péndulo de fricción triple	Péndulo de fricción quintuple
Configuración				
Capacidad de desplazamiento	Permite una capacidad de desplazamiento menor comparado con el péndulo de fricción doble y triple	Rendimiento mejorado en comparación con el péndulo de fricción simple, permitiendo mayor capacidad de desplazamiento	Menor tamaño del dispositivo con la misma capacidad de desplazamiento, si se compara con el péndulo de fricción simple y doble	La capacidad de desplazamiento es mayor si se compara con péndulos de fricción de generaciones anteriores del mismo tamaño

Tabla 10. (Continuación).

Comportamiento histerético	Presenta un comportamiento bilineal	Exhibe diferentes propiedades histeréticas ante diferentes fases del movimiento de la respuesta, en función del coeficiente de fricción de las superficies puede presentar comportamiento bilineal o trilineal	Exhibe un comportamiento trilineal lo que tiene como ventaja la adaptación ante diferentes niveles del movimiento	Presenta propiedades histeréticas distintas para las diferentes etapas del desplazamiento o movimiento
Respuesta estructural	Reduce las fuerzas transmitidas a la estructura, reduce la aceleración y desplazamientos laterales, aumenta el amortiguamiento del sistema y reduce la respuesta torsional de las estructuras durante sismos severos			
Daño	Las aceleraciones en los componentes estructurales y no estructurales disminuyen y por ende el daño ante movimientos laterales fuertes			
Amenaza sísmica	Mantiene constante la fricción, la rigidez lateral y el periodo de deslizamiento para todos los niveles de amenaza, es decir, no tiene un comportamiento adaptativo ante diferentes niveles de movimiento, diferentes al sismo máximo creible (MCE)	Comportamiento adaptativo ante diferentes niveles de amenaza sísmica, la rigidez y el amortiguamiento varían en proporción al nivel de excitación en la base de la estructura	Puede ser diseñado para diferentes niveles de amenaza sísmica debido a su comportamiento adaptativo mejorado, en comparación con el péndulo de fricción doble	Comportamiento altamente adaptativo ante diferentes niveles de amenaza sísmica, superior a las generaciones anteriores de péndulo de fricción
Inestabilidad	Su comportamiento depende de la carga axial por lo que estructuras muy livianas pueden tener problemas de levantamiento	Exhibe un mejor comportamiento ante acciones verticales en comparación con el péndulo de fricción simple	En comparación con el péndulo simple y doble, el aislador de péndulo triple es capaz de acomodarse ante el levantamiento de sus componentes	Como este tipo de aislador se desarrolló recientemente, los efectos de inestabilidad se encuentran bajo estudio

Tabla 10. (Continuación).

Temperatura	Se compone de un material termoplástico por lo que el coeficiente de fricción se degrada en función del aumento de la temperatura en las superficies del aislador			
	Ante temperaturas bajas, la rigidez y amortiguamiento de diseño se mantiene constante			
Número de péndulos efectivos	1	2	3	5
Número de fases de movimiento	1	3	5	9

6. Ejemplo

El propósito de esta sección es comparar la respuesta sísmica de un pórtico de concreto con base fija y con base aislada con aisladores de péndulo de fricción simple. El pórtico se someterá al registro sísmico de Talca 2010 (Ver Figura 50) y se comparará el desplazamiento del aislador u_b , correspondiente al desplazamiento en la base, el cortante basal normalizado por el peso total del edificio, F_b/W , y derivas de piso Δ_i .

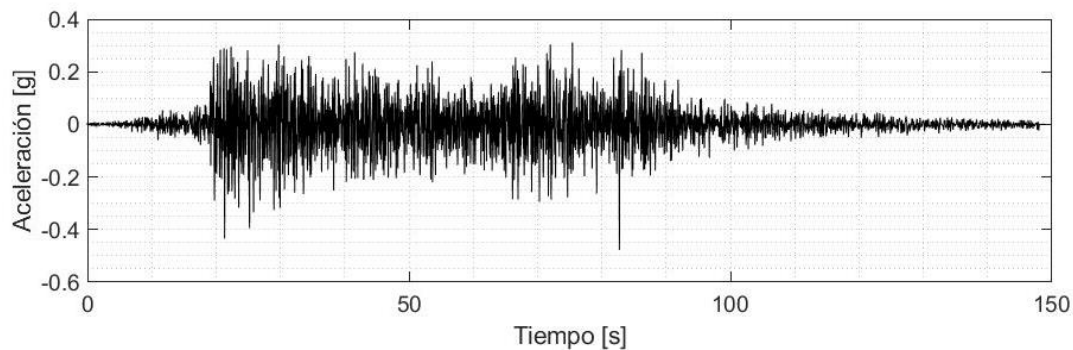


Figura 50. Registro sísmico de Talca 2010

Tomado de *Terremotos de Chile* por FCFM & ONEMI, 1994. Recuperado: February 22, 2019, de

<http://terremotos.ing.uchile.cl/>

6.1 Descripción del modelo numérico

Se considera un pórtico de corte bidimensional de cuatro pisos y dos vanos (Ver Figura 51(a)), la longitud de cada vano es de 5 [m] y la altura de cada piso es de 3.5 [m]. Se compone de vigas y columnas cuadradas de 40x40 cm de concreto reforzado ($f'c = 28 \text{ MPa}$). Adicional al peso propio se considera sobre cada piso una carga distribuida por unidad de longitud de 0.24 ton/m. Se han realizado dos modelos en el programa SAP 2000®: el primero considerando la base de la estructura como fija, y el segundo considerando base aislada mediante apoyos deslizantes tipo péndulo de fricción simple (Sección 5.1). Se realizó un análisis modal para determinar los periodos naturales y masas modales efectivas (Ver Tabla 11). El periodo fundamental de la estructura con base fija en dirección “X” es 0.276 [s].

Tabla 11.

Propiedades modales del pórtico con base fija

	Modo			
	1	2	3	4
Periodo [s]	0,276	0,096	0,062	0,051
Masa modal efectiva [%]	88,9	8,8	1,9	0,35

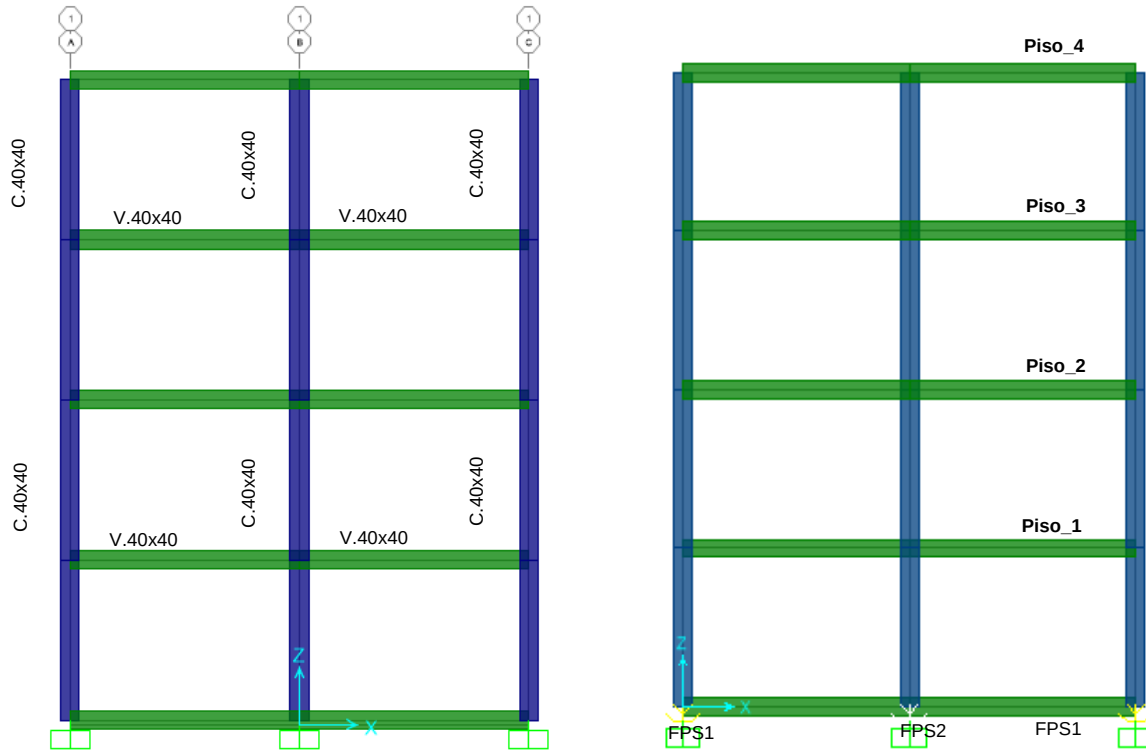


Figura 51. Geometría del pórtico (a) base fija, (b) base aislada

6.2 Propiedades del aislador de péndulo de fricción

Los aisladores de péndulo de fricción han sido modelados usando un elemento link de tipo “*Friction Pendulum Isolator*”. Para estudiar el comportamiento sísmico se ha adoptado el algoritmo propuesto por Bozzo & Mahin (1989). En primer lugar, se define un periodo objetivo de 2.5 [s], y en función de este se calcula el radio del sistema de aislamiento a partir de la ecuación 39, con lo que el radio del aislador de péndulo de fricción se ha definido como 1.55 [m].

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{R}{g}} ; R = \frac{T^2 g}{4\pi^2} \quad (39)$$

Para efectos de este análisis, se han definido propiedades en dirección vertical (U1) y horizontal (U2 y U3), despreciando los movimientos rotacionales alrededor de los ejes principales

(Ver Figura 52). En dirección horizontal se determina la rigidez del sistema de aislación, la cual es igual a:

$$k_e = \frac{W}{R} \quad (40)$$

Siendo W, la carga axial en el aislador y R el radio del péndulo. La carga axial corresponde a la suma del peso propio del pórtico y la carga adicional sobreimpuesta, la masa del sistema de aislación se desprecia por ser pequeña en comparación con la masa de la superestructura. Las reacciones en la base en dirección vertical se muestran en la Figura 53.

Link/Support Property Data

Link/Support Type: Friction Isolator

Property Name: FPS1

Property Notes:

Total Mass and Weight

Mass: 0, Rotational Inertia 1: 0, Rotational Inertia 2: 0, Rotational Inertia 3: 0

Weight: 0, Rotational Inertia 2: 0, Rotational Inertia 3: 0

Factors For Line, Area and Solid Springs

Property is Defined for This Length In a Line Spring: 1, Property is Defined for This Area In Area and Solid Springs: 1

Directional Properties

Direction	Fixed	NonLinear	Properties
☒ U1	☐	☒	Modify/Show for U1...
☒ U2	☐	☒	Modify/Show for U2...
☒ U3	☐	☒	Modify/Show for U3...
☒ R1	☒	☐	Modify/Show for R1...
☒ R2	☒	☐	Modify/Show for R2...
☒ R3	☒	☐	Modify/Show for R3...

Fix All Clear All

P-Delta Parameters

Advanced...

OK Cancel

Figura 52. Propiedades elemento tipo link

Tomado de SAP 2000 por Computers and Structures Inc., 2014. Berkeley, California.

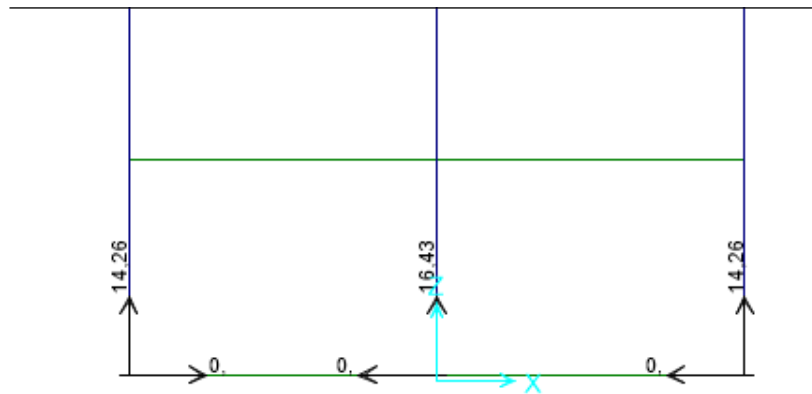


Figura 53. Reacciones en la base carga muerta-[ton]

Tomado de SAP 2000 por Computers and Structures Inc., 2014. Berkeley, California.

En función de estas reacciones se definen dos tipos aisladores, FPS1 y FPS2, la rigidez de cada uno se determina mediante la ecuación 40 y se muestra en la 0. El comportamiento cíclico no lineal del aislador ha sido modelado con una rigidez inicial (antes del deslizamiento) igual a 100000 tonf/m, como se muestra en la Figura 54 (Computers and Structures Inc., 2014). La componente friccional ha sido modelada como dependiente de la velocidad a partir de la ecuación 41, donde v es la velocidad de deslizamiento, μ_{fast} y μ_{slow} son los coeficientes de fricción a velocidad baja y velocidad alta, respectivamente y α es el parámetro que controla la transición entre μ_{slow} y μ_{fast} (Constantinou, Mokha, & Reinhorn, 1990). Los parámetros adoptados para el análisis son: $\mu_{fast} = 0.05$, $\mu_{slow} = 0.05$, $\alpha = 1$.

Tabla 12.

Rigidez del aislador FPS

	W [ton]	K[ton/m]
FPS1 [Eje A y C]	14,26	9,18
FPS2 [Eje B]	16,43	10,58

$$\mu = \mu_{fast} - (\mu_{fast} - \mu_{slow}) \cdot e^{-\alpha|v|} \quad (41)$$

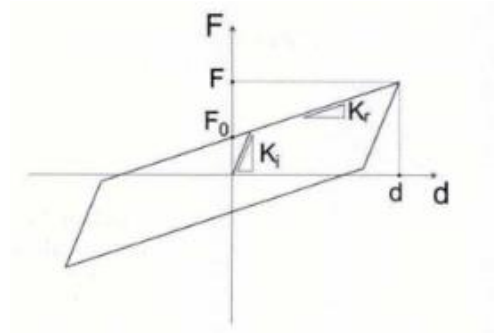


Figura 54. Comportamiento cíclico no lineal del FPS

Tomado de *SAP 2000* por Computers and Structures Inc., 2014. Berkeley, California.

En sentido U1 (Dirección Z – Ver Figura 51) se ha definido un periodo 0.05 [s], con el objetivo de que en esta dirección la estructura tenga una rigidez alta que impida el levantamiento del aislador. Como la masa de la estructura es $m=44.95/g \text{ ton} \cdot s^2/m$, la rigidez equivalente en dirección U1 es 72356,98 ton/m.

$$k = \frac{4\pi^2}{T^2} m \quad (42)$$

6.3 Resultados numéricos

Usando un análisis tiempo-historia se ha obtenido la respuesta de los dos modelos, con base fija (BF) y base aislada (BA). Se ha comparado el periodo y la forma modal del modo fundamental (Figura 55) y la historia de desplazamiento en la base (Figura 56), cortante basal normalizado (Figura 57), y derivas de piso (Figura 58).

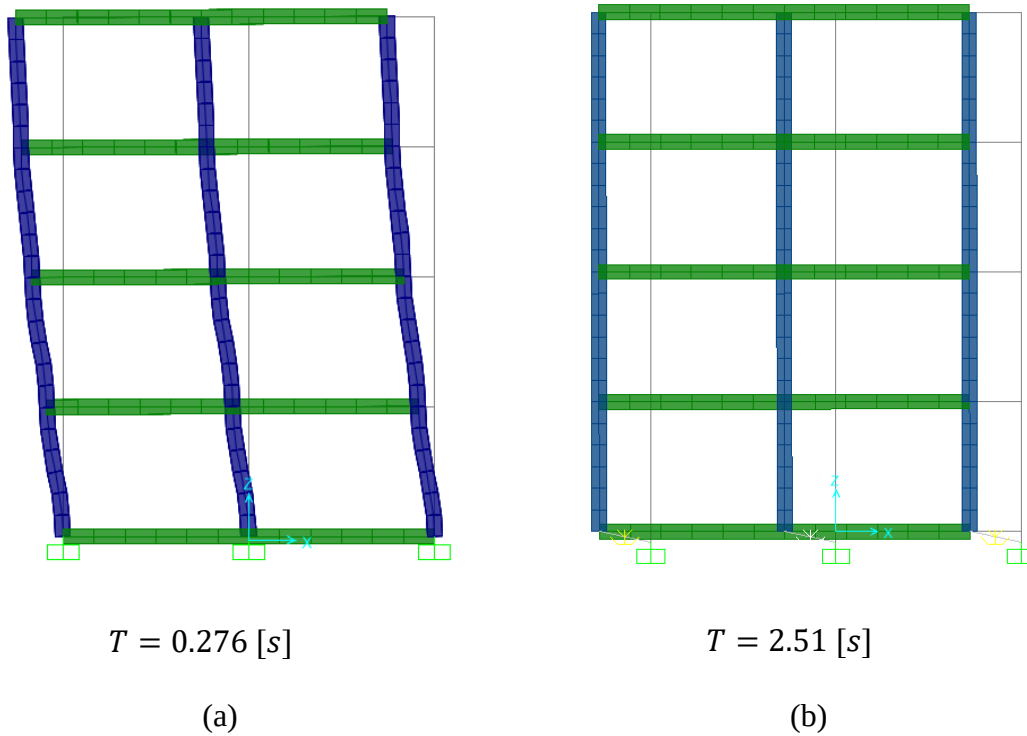


Figura 55. Forma modal – Modo 1 con (a) base fija y (b) base aislada

Tomado de SAP 2000 por Computers and Structures Inc., 2014. Berkeley, California.

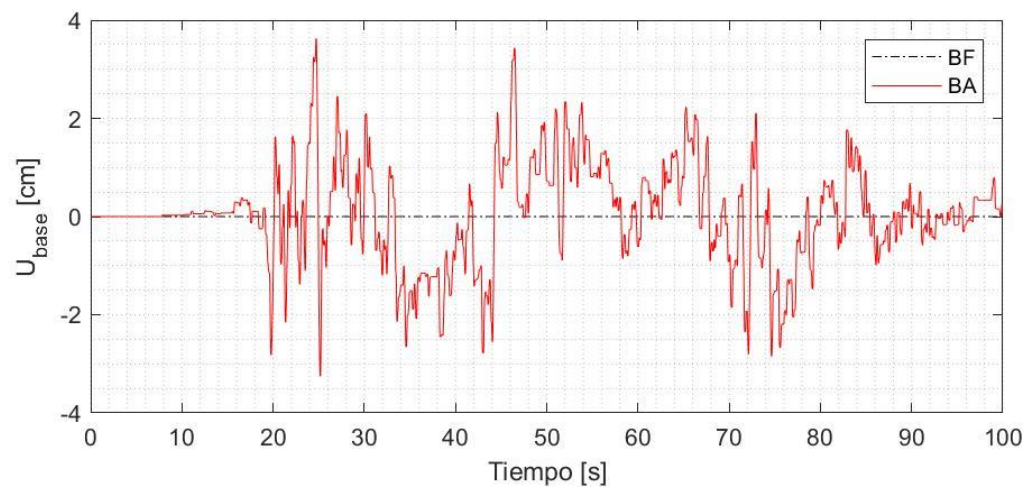


Figura 56. Historia de desplazamiento en la base

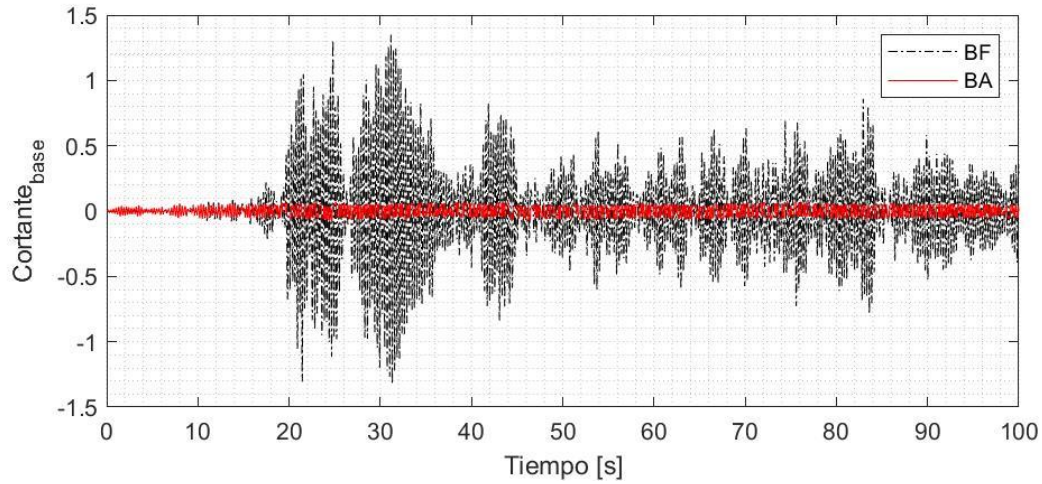


Figura 57. Historia de cortante basal normalizado

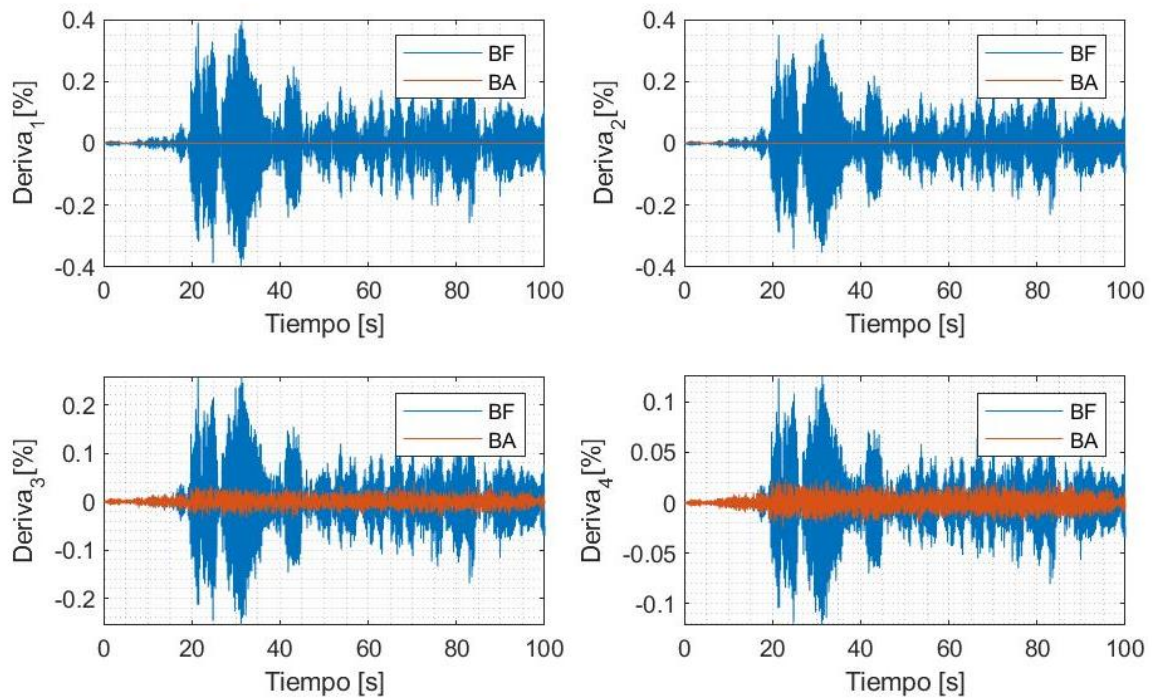


Figura 58. Historia de derivas de piso

A partir de la comparación de resultados se puede observar que el movimiento es absorbido por el péndulo de fricción disminuyendo significativamente el movimiento relativo de los entrepisos

(derivadas). De igual manera, el cortante en la base disminuye y por ende las fuerzas de diseño en el pórtico. Estos resultados concuerdan con la literatura expuesta en este documento, en la cual se muestra que el sistema de aislamiento de péndulo de fricción mejora el desempeño de la estructura. El alcance de este ejemplo corresponde a una comparación a nivel de análisis de la respuesta, por esta razón no se presentan parámetros de diseño del aislador.

7. Conclusiones

En este documento ha sido investigado el desarrollo tecnológico de los sistemas de aislamiento sísmico de base tipo péndulo de fricción, se ha presentado su clasificación en función de los péndulos de fricción efectivos, sus características mecánicas, formulación física y sus principales ventajas y desventajas. Además, se ha realizado un modelo numérico computacional implementado en SAP 2000 y se ha comparado la respuesta del modelo con base fija y con base aislada.

A medida que el aislador presenta más superficies deslizantes el comportamiento se hace más complejo, sin embargo, si los coeficientes de fricción de estas superficies son iguales la complejidad se reduce. Por ejemplo, si los coeficientes de fricción de las superficies que componen el aislador cóncavo doble son iguales, el aislador exhibe el mismo comportamiento que el aislador de péndulo simple. Esta condición permite obtener un dispositivo con dimensiones más pequeñas, lo que genera ahorro en costos, pero con la misma capacidad de desplazamiento que tendría el

aislador simple. Esta ventaja se presenta en cada avance tecnológico que se presenta en los aisladores de péndulo de fricción (Fenz & Constantinou, 2008b).

El tipo de aislador más conveniente para implementar en una estructura debe decidirse en función de las características particulares de este y a la relación costo-beneficio que aproveche de manera óptima las ventajas de cierto tipo de aislador de péndulo de fricción.

A pesar de las ventajas de los sistemas de aislamiento sísmico tipo péndulo de fricción, aún existen limitaciones que son actualmente objeto de estudio y desarrollo. Estas limitaciones se relacionan con: la respuesta a acciones verticales, levantamiento del aislador, capacidad de retención a la tensión y desplazamiento residual (Calvi & Calvi, 2018).

Con relación a la respuesta a acciones verticales, estas pueden ser de dos tipos: acciones verticales debidas a los efectos de volcamiento, y acciones verticales provenientes del movimiento del suelo. Los efectos de volcamiento debido a las fuerzas laterales pueden generar variaciones en la presión de contacto y en casos extremos el levantamiento de los soportes en estructuras esbeltas con relaciones altura-ancho grandes, y en edificios que incorporen aisladores debajo de columnas arriostradas o muros rígidos. (PC Roussis & Constantinou, 2006b), (Calvi & Calvi, 2018). En cuando a las acciones verticales provenientes del movimiento del suelo, se ha encontrado que los sistemas de aislamiento sólo proveen aislamiento horizontal, por lo cual la estructura se comportará como empotrada ante excitaciones verticales.

Algunos autores han explorado la posibilidad de desarrollar sistemas de aislamiento de base equipados con alguna capacidad a tensión, y han propuesto mecanismos retenedores de levantamiento (S Nagarajaiah, Reinhorn, & Constantinou, 1992; Panayiotis Roussis, 2009). Pero, estos mecanismos sólo han sido concebidos, implementados y validados para excitaciones unidireccionales. Recientemente se ha desarrollado un mecanismo de respuesta bidireccional con

un retenedor de levantamiento (PC Roussis & Constantinou, 2006b; PC Roussis & Constantinou, 2006a). Sin embargo, la extensión a excitaciones multidireccionales es difícil y es un campo de aplicación limitado (Calvi & Calvi, 2018).

Los códigos de diseño han implementado recomendaciones en relación a los desplazamientos residuales, las cuales son un buen punto de inicio, sin embargo, no están necesariamente basadas en fundamentos teóricos sólidos sino en evidencia experimental limitada. Además, la capacidad de restitución de los aisladores tipo péndulo de fricción a recibido poca atención y todavía representa un campo de estudio (Cardone, Gesualdi, & P, 2015).

El modelo propuesto por Sarlis & Constantinou (2016) de considerar el efecto del equilibrio de momentos presenta ventajas con respecto al modelo convencional de Fenz & Constantinou (2008). Permite considerar los efectos de: levantamiento (uplift) del aislador, placas desalineadas, variaciones de los coeficientes de fricción debidas a los efectos instantáneos de la temperatura y la velocidad, además, no hay restricciones en las propiedades geométricas y de fricción de las superficies y es posible calcular de manera explícita el desplazamiento y velocidad en cada superficie.

Se ha encontrado que la influencia de las fuerzas de inercia verticales en la respuesta estructural es insignificante para el caso de los terremotos de larga distancia, mientras que se vuelve significativa para las excitaciones cercanas a la fuente. Con relación al radio de la superficie del aislador R , la influencia de las fuerzas de inercia verticales en el valor del desplazamiento horizontal es muy significativa para pequeños valores de R y cualquier tipo de terremoto. Esta influencia es notable para los valores intermedios de R y para la profundidad media y baja de los terremotos, mientras que se vuelve insignificante para valores grandes de R (Raftoyiannis & Michaltsos, 2017).

Ignorar la componente vertical de la excitación sísmica en estructuras de periodo corto (menos de 0.60 seg), es decir, estructuras bajas y rígidas puede resultar en subestimar el cortante basal en la estructura y por ende subestimar las fuerzas de diseño (Loghman & Khoshnoudian, 2013).

8. Trabajos Futuros

En la base de los avances aquí reportados, los siguientes son posibles trabajos futuros acerca de los sistemas de péndulo de fricción:

Estado del arte de las técnicas de modelamiento numérico y análisis experimental de los aisladores tipo péndulo de fricción.

Estudio acerca del comportamiento de diferentes configuraciones del aislador de péndulo de fricción, como diferentes coeficientes de fricción y radios de curvatura.

Estudio de los aspectos económicos en la implementación de aisladores tipo péndulo de fricción.

Desarrollo de un manual de diseño de aisladores tipo péndulo de fricción en Colombia.

Referencias Bibliográficas

- Aguiar, R., Almazan, J. L., Dechent, P., & Suarez, V. (2008). *Aisladores de Base Elastomericos y FPS*. (Comisión Editorial de la Universidad de las Fuerzas Armadas, Ed.) (Primera ed). Quito, Ecuador.
- Amiri, G. G., Namiranian, P., & Amiri, M. S. (2016). Seismic Response of Triple Friction Pendulum Bearing under Near-Fault Ground Motions. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 16(06), 1550021. <https://doi.org/10.1142/S0219455415500212>
- Asai, T., & Spencer, B. F. (2015). *Structural Control Strategies for Earthquake Response Reduction of Buildings*. (Newmark Structural Engineering Laboratory. University of Illinois at Urbana-Champaign., Ed.).
- ASCE/SEI 7-16. (2016). *Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures*. (American Society of Civil Engineers, Ed.). Reston, Virginia, USA.
- Barbas, J., Matusewitch, P., & Williams, M. (n.d.). Comparative of single pendulum and triple pendulum seismic isolation bearings on the St. Laurent Bridge, Quebec, Canadá. In *Chapter 8*.
- Barucci, C. (1990). La casa antisísmica [The antiseismic house]. Gangemi, Tome.
- Becker, T., Bao, Y., & Mahin, S. (2017). Extreme behavior in a triple friction pendulum isolated frame. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 46(15), 2683–2698. <https://doi.org/10.1002/eqe.2924>
- Bonilla Sosa, L. M. (2012). *Teoria del Aislamiento Sismico para Edificaciones. Tesis para obtener el título de Ingeniero Civil*. Universidad Nacional Autónoma de México.

- Bozzo, L., & Mahin, S. (1989). *Response of elastic single degree of freedom systems supported on FPS connections*. (Earthquake Engineering Research Center. University of California at Berkeley. Report N-I UCB/EERC-89/09, Ed.). Berkeley, California.
- Braz-César, M., & Carneiro De Barros, R. (2013). Passive Control of Civil Engineering Structures. In *4th International Conference on Integrity, Reliability and Failure* (Vol. 1, pp. 1–12). Retrieved from https://bibliotecadigital.ipb.pt/bitstream/10198/11269/1/Braz_Cesar_Artigo_4756_IRF2013.pdf
- Bustos, E. A., Uliarte, R. J., Morandi, J. O., & Uliarte, J. A. (2014). Diseño Estructural De Un Puente Carretero Con Aisladores Sismicos Tipo Péndulo Friccional, Ubicado En La Provincia De San Juan, Argentina. In *Jornadas Argentinas de Ingeniería Estructural* (p. 2). Buenos Aires.
- Calvi, P. M., & Calvi, G. M. (2018). Historical development of friction-based seismic isolation systems. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 106(August 2017), 14–30. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2017.12.003>
- Cango P., A. D., & Flores S., F. X. (2018). *Diseño y análisis de edificaciones con aisladores de base tipo FPT*. Universidad de Cuenca. Retrieved from <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/30283>
- Cardone, D., Gesualdi, G., & P, B. (2015). Restoring capability of friction pendulum seismic isolation systems. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 13(8), 2449–2480.
- Chuman Bermeo, A. E., & Valladares Ojeda, C. I. (2017). *Análisis y Diseño Estructural Comparativo de una Edificación de Quince Niveles , con y sin Aisladores Sísmicos Elastoméricos con Núcleo de Plomo*. Universidad de San Martín de Porres.

- Comisión asesora permanente para el regimen de construcciones sismo resistente. (2010). *Reglamento colombiano de construcción sismoresistente. NSR-10. Título B-cargas*. (A. C. de I. Sísmica, Ed.). Bogotá. Retrieved from http://www.uptc.edu.co/export/sites/default/facultades/f_ingenieria/pregrado/civil/documentos/NSR-10_Titulo_B.pdf
- Computers and Structures Inc. (2014). SAP 2000. Berkeley, California: Computers and Structures Inc.
- Constantinou, M. (2004). *Friction Pendulum Double Concave Bearing*. University at Buffalo. New York.
- Constantinou, M., Mokha, A., & Reinhorn, A. (1990). *Teflon Bearings in Base Isolation II: Modeling*. *Journal of Structural Engineering-asce - J STRUCT ENG-ASCE* (Vol. 116). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1990\)116:2\(455\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1990)116:2(455))
- Constantinou, M., Whittaker, A., Kalpakidis, Y., Fenz, D., & Warn, G. P. (2006). *Performance of seismic isolation hardware under service and seismic loading*. New York. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4633.8166>
- Corporación de Desarrollo Tecnológico, & de la Construcción, C. C. (2012). *Protección Sísmica de Estructuras*. (C. C. de la Construcción, Ed.). Santiago de Chile: Trama Impresores S.A. Retrieved from www.cdt.cl
- Datta, T. K. (2003). A State-of-the-Art Review on Active Control of Structures. *ISET Journal of Earthquake Technology, Paper No, 430(1)*, 1–17.
- De Domenico, D., Ricciardi, G., & Benzoni, G. (2018). Analytical and finite element investigation on the thermo-mechanical coupled response of friction isolators under bidirectional excitation. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 106(December 2017), 131–147.

<https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2017.12.019>

Delgado, I., Aguiar, R., & Caiza, P. (2017). Bilinear Model Proposal for Seismic Analysis Using

Triple Friction Pendulum (TFP) Bearings. *Open Journal of Civil Engineering*, 7, 14–31.

<https://doi.org/10.4236/ojce.2017.71002>

Dhankot, M. A., & Soni, D. P. (2017). Behaviour of Triple Friction Pendulum Isolator under

Forward Directivity and Fling Step Effect. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 21, 872–881.

<https://doi.org/10.1007/s12205-016-0690-3>

Drazin, P. L., & Govindjee, S. (2017). A Nonlinear Kinetic Model for Multi-Stage Friction

Pendulum Systems. California: The University of California, Berkeley.

El Colombiano. (2012, April 17). Terremoto en Ecuador sacude Cali, Popayán y suroccidente del

país. *Periódico El Colombiano*. Retrieved from

<http://www.elcolombiano.com/colombia/terremoto-en-ecuador-sacude-cali-popayan-y-suroccidente-del-pais-CB3982774>

El Tiempo. (2004, November 16). Sismo a las 4:06 de la madrugada. *Periódico El Tiempo*.

Retrieved from <https://www.eltiempo.com/archivo/documento/MAM-1591237>

El Tiempo. (2011). Cali tiene la primera clínica antisísmica de Colombia. *Periódico El Tiempo*.

FCFM, & ONEMI. (1994). Terremotos de Chile. Retrieved February 22, 2019, from

<http://terremotos.ing.uchile.cl/>

FEMA 1050. (2015). *NEHRP Recommended Seismic Provisions for New Buildings and Other*

Structures - Provisions and Commentary. (Federal Emergency Management Agency &

Building Seismic Safety Council, Eds.) (Vol. I). Washington D.C, USA: National Institute of

Building Sciences.

Fenz, D., & Constantinou, M. (2006). Behaviour of the double concave Friction Pendulum bearing.

Earthquake Engineering & Structural Dynamics, (June), 1403–1424.
<https://doi.org/10.1002/eqe>

Fenz, D., & Constantinou, M. (2008a). Development, implementation and verification of dynamic analysis models for multi-spherical sliding bearings : Technical Report MCEER-08-0018.

Fenz, D., & Constantinou, M. (2008b). *Mechanical Behavior of Multi-Spherical Sliding Bearings. Technical Report MCEE-08-0007*. New York.

Fenz, D., & Constantinou, M. (2008c). Modeling triple friction pendulum bearings for response story analysis. *Earthquake Spectra*, 24(4), 1011–1028.

Fenz, D., & Constantinou, M. (2008d). Spherical Sliding Isolation Bearings with Adaptive Behavior: Experimental Verification. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 37(2), 185–205.

Fenz, D., & Constantinou, M. (2008e). Spherical Sliding Isolation Bearings with Adaptive Behavior: Theory. *Earthq Eng Struct Dyn*, 37, 163–183.

Forrai, A., Hashimoto, S., Funato, H., & Kamiyama, K. (2002). Structural control technology: System identification and control of flexible structures. *Computing and Control Engineering Journal*. <https://doi.org/10.1049/ccej:20010602>

Furinghetti, M., Pavese, A., Quaglini, V., & Dubini, P. (2019). Experimental investigation of the cyclic response of double curved surface sliders subjected to radial and bidirectional sliding motions. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 117(December 2018), 190–202.
<https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.11.020>

Gandelli, E. (2017). *Advanced tools for the design of sliding isolation systems for seismic-retrofitting of hospitals*.

Gandelli, E., Quaglini, V., Dubini, P., Bocciarelli, M., & Poggi, C. (2013). Frictional heating in

- sliding seismic isolators. *Anidis* 2013. <https://doi.org/10.13140/2.1.3802.3687>
- Gomez, D., Marulanda, J., & Thomson, P. (2008). Control systems for dynamic loading protection of civil structures. *Dyna-Colombia*, 75(155), 77–89.
- Grupo de Investigación en Ingeniería Sísmica, Eólica, G. y E. (G-7). (2018). *Desarrollo tecnológico de un aislador sísmico de bajo costo para edificaciones de baja altura*.
- Hall, J., Heaton, T., Halling, M., & Wald, D. (1995). Near-Source Ground Motion and its Effects on Flexible Buildings. *Earthquake Spectra*, 11(4), 569–605. <https://doi.org/10.1193/1.1585828>
- Heaton, T., Hall, J., Wald, D., & Halling, M. (1995). Response of high-rise and base-isolated buildings to a hypothetical M w 7.0 blind thrust earthquake. *Science*, 267(5195), 206–211. <https://doi.org/10.1126/science.267.5195.206>
- Heraldo, E. (2016, April 17). Temblor en Ecuador sacude a centro y occidente de Colombia. *Periódico El Heraldó*. Retrieved from <https://www.elheraldo.co/nacional/temblor-sacude-centro-y-occidente-de-colombia-255042>
- Jaimes Rodriguez, L. R. (2014). *Analisis Experimental de Aisladores Sismicos Tipo Pendulo de Friccion*. Universidad Industrial de Santander.
- Jangid, R. (2005). Optimum friction pendulum system for near-fault motions. *Engineering Structures*, 27(3), 349–359. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2004.09.013>
- Kassem, M. A. E., Elkhoreby, S. R., & Seleemah, A. A. (2015). The Effect of using Seismic Base Isolation Techniques on Balancing the Torsion in Asymmetric Multi-story Structures The Effect of using Seismic Base Isolation Techniques on Balancing the Torsion in Asymmetric Multi-story Structures. In ICASGE'15 (Ed.), *International Conference on Advances in Structural and Geotechnical Engineering*. Hurghada, Egypt.

- Keikha, H., & Ghodrati Amiri, G. (2019). Seismic Performance Assessment of Quintuple Friction Pendulum Isolator with a Focus on Frictional Behavior Impressionability from Velocity and Temperature. *Journal of Earthquake Engineering*, 1–31. <https://doi.org/10.1080/13632469.2019.1568929>
- Khoshnoudian, F., & Hemmati, A. (2011). Seismic response of base-isolated structures using DCFP bearings with tri-linear and bi-linear behaviors. *Procedia Engineering*, 14, 3027–3035. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.07.381>
- Khoshnoudian, F., & Rabiei, M. (2010). Seismic Response of Double Concave Friction Pendulum Base-Isolated Structures considering Vertical Component of Earthquake. *Advances in Structural Engineering*, 13(1), 1–13. <https://doi.org/10.1260/1369-4332.13.1.1>
- Kim, Y. S., & Yun, C. B. (2007). Seismic response characteristics of bridges using double concave friction pendulum bearings with tri-linear behavior. *Engineering Structures*, 29(11), 3082–3093. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2007.02.009>
- Kravchuk, N., Colquhoun, R., & Porbaha, A. (2008). Development of a Friction Pendulum Bearing Base Isolation System for Earthquake Engineering Education. *Proceedings of the 2008 American Society for Engineering Education Pacific Southwest Annual Conference*, (1), 16. Retrieved from [https://engineering.purdue.edu/UCIST/publications/publications/Base isolation system_Ali.pdf](https://engineering.purdue.edu/UCIST/publications/publications/Base%20isolation%20system_Ali.pdf)
- Kumar, M., Whittaker, A., & Constantinou, M. (2014). Characterizing friction in sliding isolation bearings. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 44(9). <https://doi.org/10.1002/eqe.2524>
- Laverde, L. (2017). *Sistemas Modernos de Protección Sísmica en Edificaciones*. Universidad Industrial de Santander.

- Lee, D., & Constantinou, M. (2015). Quintuple Friction Pendulum Isolator Behavior , Modeling and Validation. *Technical Report MCEER-15-0007*.
- Loghman, V., & Khoshnoudian, F. (2013). Effect of vertical component of earthquake on seismic responses of triple concave friction pendulum base-isolated structures. *Journal of Vibration and Control*, 10n(April). <https://doi.org/10.1177/1077546313503359>
- Luca, S.-G., Chira, F., & Rosca, V.-O. (2005). *Passive Active and Semi-Active Control Systems in Civil Engineering. Buletinul Institutului Politehnic Din Iasi*.
- Malekzadeh, M., & Taghikhany, T. (2010). Adaptive Behavior of Double Concave Friction Pendulum Bearing and its Advantages over Friction Pendulum Systems. *Scientia Iranica*, 17(2).
- Manarbek, S. (2012). *Study of base isolation systems*. Massachusetts Institute of Technology.
- Marko, J. (2006). *Influence of damping systems on building structures subject to seismic effects*. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2004.07.008>
- Mcvitty, W. J., & Constantinou, M. (2015). *Property Modification Factors for Seismic Isolators : Design Guidance for Buildings. Technical Report MCEER-15-0005*. New York.
- Mohammadi, A., & Nouri, G. (2017). Investigation on the Effect of Near-Fault Earthquake on Double Concave Friction Pendulum (DCFP) Base Isolated Buildings. *Procedia Engineering*, 199, 1731–1736. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.09.418>
- Mokha, A., Constantinou, M., & Reinhorn, A. (1990). Teflon Bearings in Base Isolation. I Testing. *ASCE Journal of Structural Engineering*, 116(2), 438–454.
- Moreno, D. M., Yamín, L. E., & Reyes, J. C. (n.d.). *Estudio Experimental de Aisladores Sísmicos Tipo Péndulo de Fricción en Modelos a Escala Reducida*.
- Morgan, T. (2007). *The use of innovative base isolation systems to achieve complex seismic*

- performance objectives*. University of California, Berkeley.
- Morgan, T., & Mahin, S. (2011). *The use of base isolation systems to achieve complex seismic performance objectives*. Berkeley.
- Mosqueda, G., Whittaker, A., & Fenves, G. L. (2004). Characterization and Modeling of Friction Pendulum Bearings Subjected to Multiple Components of Excitation. *Journal of Structural Engineering*, 130(3), 433–442. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2004\)130:3\(433\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2004)130:3(433))
- Mostaguel, N., Hejazi, M., & Tanbakuchi, J. (1983). Response of sliding structure to harmonic support motion. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 11, 355–366. <https://doi.org/10.1002/eqe.4290110305>
- Nagarajaiah, S., Reinhorn, A., & Constantinou, M. (1992). Experimental study of sliding isolated structures with uplift restraint. *ASCE J Struct Eng*, 118(6), 1666–1682.
- Nagarajaiah, S., & Sun, X. (2001). Base-Isolated FCC Building: Impact Response in Northridge Earthquake. *Journal of Structural Engineering*, 1063–1075. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2001\)127](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2001)127)
- Nguyen, N. V, Nguyen, C. H., Hoang, H. P., & Huong, K. T. (2018). Performance of Single Friction Pendulum bearing for isolated buildings subjected to seismic actions in Vietnam. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 143(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/143/1/012048>
- Okazaki, T., Sato, E., Ryan, K., Sasaki, T., & Mahin, S. (2014). Performance of Triple-Pendulum Bearings Observed in a Full-Scale Shake-Table Test Program.
- Oviedo, J. A. (2018). Aislamiento Sísmico de Edificaciones y Puentes. In Sociedad Colombiana de Ingenieros (Ed.), *Jornadas XVII Geotécnicas y XX Estructurales*. Bogotá.
- Oviedo, J. A., & Duque, M. del P. (2009). Situación de las Técnicas de Control de Respuesta

- Sísmica en Colombia. *Eia*, 12(October), 113–124.
- Piscal, C. M. (2017). Aislamiento Sísmico de Edificaciones, Aplicación en Colombia. In Universidad Industrial de Santander (Ed.), *XXVI Semana Técnica Ingeniería Civil*. Bucaramanga.
- Piscal, C. M., & López, F. (2016). Consecuencias de la posible aplicación a Colombia de las normas más actuales sobre aislamiento sísmico de edificios. *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, 21,4(October), 415–436.
- Ponzo, F., Cesare, A., Leccese, G., & Nigro, D. (2015). Shaking table tests of a base isolated structure with double concave friction pendulum bearings. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, 48(2), 136–144.
- Quaglini, V., Bocciarelli, M., Gandelli, E., & Dubini, P. (2014). Numerical Assessment of Frictional Heating in Sliding Bearings for Seismic Isolation. *Journal of Earthquake Engineering*, 18(8), 1198–1216. <https://doi.org/10.1080/13632469.2014.924890>
- Rabiei, M., & Khoshnoudian, F. (2011). Response of multistory friction pendulum base-isolated buildings including the vertical component of earthquakes. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 38(10), 1045–1059. <https://doi.org/10.1139/l11-064>
- Rabiei, M., & Khoshnoudian, F. (2013). Seismic Response of Elevated Liquid Storage Tanks Using Double Concave Friction Pendulum Bearings with Tri-Linear Behavior. *Advances in Structural Engineering*, 16(2).
- Raftoyiannis, I., & Michaltsos, G. (2017). The influence of the vertical inertia forces on the behavior of friction pendulum bearings (FPB). *Archive of Applied Mechanics*, 87(3), 427–437. <https://doi.org/10.1007/s00419-016-1201-1>
- Rendón, J. (2009). El aislamiento sísmico de estructuras - Su aplicación en Colombia. In

Encuentro Internacional del Acero en Colombia. Cali.

- Roussis, P. (2009). Study on the effect of uplift-restraint on the seismic response of base isolated structures. *ASCE J. Struct. Eng*, 135, 1462–1471.
- Roussis, P., & Constantinou, M. (2006a). Experimental and analytical studies of structures seismically isolated with an uplift restraining friction pendulum system. *Earthq Eng Struct Dyn*, 35(5), 595–611.
- Roussis, P., & Constantinou, M. (2006b). Uplift-restraining friction pendulum seismic isolation system. *Earthq Eng Struct Dy*, 35(5), 577–593.
- Saaed, T. E., Nikolakopoulos, G., Jonasson, J.-E., & Hedlund, H. (2015). A state-of-the-art review of structural control systems. *Journal of Vibration and Control*, 21(5), 919–937. <https://doi.org/10.1177/1077546313478294>
- Santos, M. (2011). Energy Dissipation Systems for Buildings, (October), 1–10.
- Sarkisian, M., Lee, P., Long, E., Shook, D., & Díaz, A. (2013). Experiences with friction pendulumTM seismic isolation in California. *WIT Transactions on the Built Environment*, 132, 357–368. <https://doi.org/10.2495/ERES130291>
- Sarlis, A., & Constantinou, M. (2013). Model of Triple Friction Pendulum Bearing for General Geometric and Frictional Parameters and for Uplift Conditions.
- Sarlis, A., & Constantinou, M. (2016). A model of triple friction pendulum bearing for general geometric and frictional parameters. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*. <https://doi.org/10.1002/eqe>
- Sarlis, A., Constantinou, M., & Reinhorn, A. (2013). Shake Table Testing of Triple Friction Pendulum Isolators under Extreme Conditions. *Earthquake Engineering to Extreme Events*, 349.

- Shah, V. M., & Psoni, D. (2017). Response of the double concave friction pendulum system under triaxial ground excitations. *Procedia Engineering*, 173(1997), 1870–1877. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.12.240>
- Skinner, R., Robinson, W. H., & McVerry, G. (1993). *An introduction to seismic isolation*. (John Wiley and Sons, Ed.), *John Wiley & Sons* (Vol. 12). England. [https://doi.org/10.1016/0267-7261\(93\)90010-O](https://doi.org/10.1016/0267-7261(93)90010-O)
- Sodha, A. H., Soni, D. P., Desai, M. K., & Kumar, S. (2017). Behavior of Quintuple Friction Pendulum System Under Near-Fault Earthquakes. *Journal of Earthquake and Tsunami*, 11(05).
- Sodha, A. H., Vasanwala, S., & Soni, D. (2018). Probabilistic Evaluation of Seismically Isolated Building Using Quintuple Friction Pendulum Isolator. In *Innovation in Infrastructure* (pp. 149–159). Springer Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-13-1966-2>
- Soong, T. T., & Spencer, B. F. (2000). Active, semi-active and hybrid control of structures. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, 33(3), 387–402.
- Thenozhi, S., & Yu, W. (2013). Advances in modeling and vibration control of building structures. *Annual Reviews in Control*, 37(2), 346–364. <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2013.09.012>
- Tsai, C. S., Su, H. C., & Chiang, T. C. (2014). Equivalent series system to model a multiple friction pendulum system with numerous sliding interfaces for seismic analyses. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 13(1), 85–99. <https://doi.org/10.1007/s11803-014-0214-4>
- Universidad EAFIT. (2017). *EAFIT y Ecuas Consultores crean un aislador sísmico*. Retrieved from <http://www.eafit.edu.co/sitionoticias/2017/eafit-y-ecuas-consultores-crean-un-aislador-sismico>

- Villavicencio C, E. G., & Díaz M, S. D. (2015). *Análisis sísmico estructural comparativo para edificios con aisladores de base tipo elastoméricos y friccionantes, para los diferentes tipos de suelos del Ecuador*. Escuela Politécnica Nacional.
- Warn, G. P., & Ryan, K. L. (2012). A Review of Seismic Isolation for Buildings: Historical Development and Research Needs. *Buildings*, 2(4), 300–325.
<https://doi.org/10.3390/buildings2030300>
- Westermo, B., & Udwadia, F. (1983). Periodic response of a sliding oscillator system to harmonic excitation. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 11(1), 135–146.
<https://doi.org/10.1002/eqe.4290110111>
- Williams, F., & Condoy, C. (2013). *Guía de diseño y fabricación de un aislador elastomérico para una edificación de cuatro pisos*. Universidad de las Fuerzas Armadas.
- Wu, H., & Samail, B. (2002). Shake Table Testing of a Base Isolated Model. *Engineering Structures*, 24(9), 1203–1215.
- Yu, W., & Thenozhi, S. (2016). *Active Structural Control with Stable Fuzzy PID Techniques*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-28025-7>
- Zayas, V., Low, S., & Mahin, S. (1990). A Simple Pendulum Technique for Achieving Seismic Isolation. *Earthquake Spectra*, 6(2), 317–333.
- Zayas, V., Low, S., & Mahin S. (1987). *The FPS earthquake resisting system: Experimental report (ubc/eerc-87/01)*. University of California, Berkeley.