

---

Aislamiento Sísmico Tipo Péndulo de Fricción en Edificios

Andrés Felipe Rozo Torres

Trabajo de Grado para optar al título de Especialista en Estructuras

Director

Álvaro Viviescas Jaimes

Ingeniero Civil - PhD.

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Especialización en Estructuras

Bucaramanga

2019

---

---

**Tabla de contenido**

|                                                       |    |
|-------------------------------------------------------|----|
| Introducción                                          | 12 |
| 1. Objetivos                                          | 13 |
| 1.1. Objetivo general                                 | 13 |
| 1.2. Objetivos específicos                            | 13 |
| 2. Alcance                                            | 13 |
| 3. Comportamiento sísmico de edificaciones            | 14 |
| 3.1. Estructura                                       | 14 |
| 3.2. Daños por sismo en edificaciones                 | 16 |
| 3.2.1. Chile 2010                                     | 16 |
| 3.2.2. México 2017                                    | 21 |
| 3.2.3. Nueva Zelanda 2011                             | 23 |
| 4. Sistemas de protección sísmica                     | 26 |
| 4.1. Activo e híbrido                                 | 29 |
| 4.2. Semiactivo                                       | 30 |
| 4.3. Pasivo                                           | 31 |
| 4.4. Aislamiento sísmico                              | 33 |
| 4.4.1. Componentes de un sistema de aislación sísmico | 37 |
| 4.4.2. Formulación de energía                         | 38 |

---

|                                                                                    |    |
|------------------------------------------------------------------------------------|----|
| AISLAMIENTO SÍSMICO TIPO FPS EN EDIFICIOS                                          | 5  |
| <hr/>                                                                              |    |
| 5. Aspectos normativos                                                             | 39 |
| 5.1. Colombia                                                                      | 39 |
| 5.2. Internacional                                                                 | 40 |
| 6. Aislamiento con péndulo de fricción                                             | 41 |
| 6.1. Antecedentes                                                                  | 41 |
| 6.2. Descripción del sistema                                                       | 43 |
| 6.2.1. Ecuaciones de los aisladores tipo péndulo de fricción                       | 46 |
| 6.2.2. Procedimiento de diseño                                                     | 50 |
| 6.3. Clasificación de aisladores tipo péndulo de fricción                          | 52 |
| 6.4. Casos de éxito                                                                | 54 |
| 7. Caso colombiano                                                                 | 57 |
| 7.1. Protección sísmica a edificaciones en Colombia                                | 57 |
| 7.2. Casos de aplicación                                                           | 59 |
| 8. Análisis crítico de la protección sísmica mediante aislador péndulo de fricción | 61 |
| 9. Conclusiones                                                                    | 63 |
| Referencias Bibliográficas                                                         | 65 |

---

---

**Lista de Tablas**

|                                                                                                                                                                       |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 1. Muertes, daño en vivienda y perdida de %PIB por sismo.                                                                                                       | 16 |
| Tabla 2. Número de casos de edificios severamente dañados.                                                                                                            | 21 |
| Tabla 3. Clasificación de los sistemas de protección sísmica.                                                                                                         | 28 |
| Tabla 4. Aspectos deseables para el uso de dispositivos de control pasivo de respuesta sísmica dentro de las prácticas de diseño y construcción colombianas actuales. | 32 |
| Tabla 5. Normativas internacionales.                                                                                                                                  | 41 |
| Tabla 6. Ventajas y desventajas del aislador tipo péndulo de fricción.                                                                                                | 53 |
| Tabla 7. Aplicación de aislamiento sísmico de base en edificaciones.                                                                                                  | 57 |

---

---

**Lista de figuras**

|                                                                                                                |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1. Transmisión de movimientos del suelo.                                                                | 14 |
| Figura 2. Aceleración y desplazamiento de la estructura.                                                       | 15 |
| Figura 3. Edificios habitacionales de la ciudad de Santiago con daño severo en el nivel de estacionamientos.   | 17 |
| Figura 4. Edificios habitacionales de la ciudad de Concepción con daño severo en el nivel de estacionamientos. | 18 |
| Figura 5. Edificios de muros de carga colapsados durante el sismo del 27 de febrero.                           | 19 |
| Figura 6. Daño por aplastamiento en muro.                                                                      | 20 |
| Figura 7. Pandeo por aplastamiento en muro de concreto.                                                        | 20 |
| Figura 8. Daño por cortante en una columna.                                                                    | 21 |
| Figura 9. casa colapsada.                                                                                      | 22 |
| Figura 10. Edificio colapsado México.                                                                          | 22 |
| Figura 11. Colapso de edificio, el más grave que se haya visto desde el sismo de 1985.                         | 23 |
| Figura 12. Poco detalle en la conexión de la columna.                                                          | 24 |
| Figura 13. El edificio Pico Wholefood fue seriamente afectado por el sismo.                                    | 24 |
| Figura 14. Casa colapsada en el centro.                                                                        | 24 |
| Figura 15. Daño en columnas.                                                                                   | 25 |
| Figura 16. Fallas severas por cortante en la columna.                                                          | 25 |
| Figura 17. Falla por pandeo y aplastamiento de un muro.                                                        | 26 |
| Figura 18. Sistema de control activo.                                                                          | 28 |
| Figura 19. Esquema de funcionamiento de un sistema de control híbrido.                                         | 30 |

---

---

|                                                                                                                   |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 20. Sistemas semiactivos de protección sísmica.                                                            | 31 |
| Figura 21. Mecanismo de operación del sistema de control pasivo.                                                  | 31 |
| Figura 22. Técnica de aislamiento sísmico en la base.                                                             | 34 |
| Figura 23. Efectos del aislamiento de la base en la aceleración espectral.                                        | 35 |
| Figura 24. Efectos del aislamiento de base sobre el desplazamiento lateral.                                       | 36 |
| Figura 25. Efectos del aislamiento de base en diferentes condiciones de suelo.                                    | 36 |
| Figura 26. Componentes de un sistema de aislamiento.                                                              | 37 |
| Figura 27. La estructura aislada permanece intacta después de 58 sismos incluyendo cargas sísmicas de magnitud 8. | 42 |
| Figura 28. La estructura no aislada falla después de 3 sismos de magnitudes 5, 6 y 7, respectivamente.            | 43 |
| Figura 29. Sistema de péndulo de fricción.                                                                        | 44 |
| Figura 30. Movimiento pendular.                                                                                   | 45 |
| Figura 31. Movimiento de péndulo deslizante.                                                                      | 45 |
| Figura 32. Deformada del aislador tipo péndulo de fricción.                                                       | 47 |
| Figura 33. Ciclo de histéresis del aislador.                                                                      | 48 |
| Figura 34. Diagrama de cuerpo libre FPS.                                                                          | 49 |
| Figura 35. Galería de arte de Christchurch.                                                                       | 55 |
| Figura 36. Catedral La Luz de Cristo.                                                                             | 55 |
| Figura 37. Puente La Estampilla.                                                                                  | 56 |
| Figura 38. Aisladores usados en el puente La Estampilla.                                                          | 56 |
| Figura 39. Viaducto Gualanday II.                                                                                 | 57 |

---

---

|                                                                                                              |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 40. Levantamiento de edificios y puentes con aisladores en Colombia, realizado por el comité AIS-700. | 58 |
| Figura 41. Uso de la edificación con aislamiento.                                                            | 58 |
| Figura 42. Clínica Comfandi, primer edificio aislado en Colombia.                                            | 59 |
| Figura 43. Hospital Imbanaco.                                                                                | 60 |
| Figura 44. Edificio fundadores Universidad Autónoma de Manizales.                                            | 60 |

---

---

## Resumen

**Título:** Aislamiento Sísmico Tipo Péndulo de Fricción en Edificios\*

**Autor:** Andres Felipe Rozo Torres\*\*

**Palabras claves:** protección sísmica, aislamiento sísmico, péndulo de fricción

### Descripción:

El aislamiento sísmico tiene como objetivo reducir la energía que es transmitida a la estructura durante un sismo mediante elementos flexibles horizontalmente llamados aisladores sísmicos, los cuales se desarrollaron con el fin de modificar las características dinámicas de las estructuras para así reducir el daño estructural, el cual está asociado a la protección de la vida de las personas y de su patrimonio. El péndulo de fricción es un aislador deslizante en el cual, la fuerza de restauración se proporciona mediante la gravedad, el aislador sísmico tipo péndulo de fricción tiene la característica de permitir a la estructura desplazamientos, cargas verticales y cortantes muy grandes.

Con el objetivo de describir el comportamiento de los aisladores tipo péndulo de fricción en la protección sísmica de edificaciones en Colombia y realizar un análisis crítico sobre la posible aplicación del mismo, se desarrolló el siguiente trabajo en el cual se describen los daños por sismos presentados en países con tipología de edificios similares a los construidos en Colombia, la clasificación de los sistemas de protección sísmica, el estado actual del sistema de aislamiento sísmico tipo péndulo de fricción, su clasificación, su comportamiento y la formulación para el diseño. También se presenta la normativa referente al aislamiento sísmico y los casos de éxito de este tipo de protección en Colombia y el ámbito internacional.

---

\*Monografía

\*\* Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas, Escuela de Ingeniería Civil. Director, PhD Álvaro Viviescas Jaimes

---



---

**Abstract**

**Title:** Pendulum Friction Seismic Isolator on Buildings\*

**Author:** Andres Felipe Rozo Torres\*\*

**Keywords:** seismic protection, seismic isolation, friction pendulum system

**Description:**

The seismic isolation aims to reduce the energy that is transmitted to the structure during an earthquake by means of horizontally flexible elements called seismic isolators, which were developed in order to modify the dynamic characteristics of the structures in order to reduce the structural damage, which It is associated with the protection of people's lives and their heritage. The friction pendulum is a sliding isolator in which, the restoring force is provided by gravity, the friction pendulum seismic isolator has the characteristic of allowing the structure to have grand displacements, very large vertical loads and shear.

With the objective of describing the behavior of the pendulum friction type insulators in the seismic protection of buildings and to do a critical analysis about its implementation in Colombia, the following work was developed in which the earthquake damage presented in different countries with type of buildings similar to those built here in Colombia is described, the classification of seismic protection systems, the current state of the friction pendulum type seismic isolation system, its classification, its behavior and the design formulation. The regulations regarding seismic isolation and the success stories of this type of protection in Colombia and the international arena are also presented.

---

\*Monograph

\*\* Physicomechanical faculty of engineering, School of Civil Engineering. Director, PhD Álvaro Viviescas Jaimes

---

---

## Introducción

Para mejorar la seguridad y el comportamiento estructural ante sismos severos se desarrollaron técnicas efectivas y confiables basadas en los sistemas de control de movimiento. Entre los esquemas de control desarrollados, el aislamiento sísmico es una de las alternativas más promisorias. Puede adoptarse tanto para el diseño de estructuras nuevas como para la rehabilitación de estructuras existentes (Moreno, Yamín, & Reyes, 2015).

En las últimas décadas, el sistema de péndulo de fricción (Friction Pendulum System o FPS) se ha convertido en una técnica muy efectiva para la protección de edificios (Castaldo, Palazzo, Ferrentino, & Petrone, 2017). El FPS es un tipo de sistema de aislamiento sísmico deslizante que utiliza su curvatura de superficie para generar la fuerza restauradora de la acción del péndulo del peso de la estructura en el FPS. El período natural de la estructura aislada se vuelve independiente de la masa de la superestructura, ya que solo depende del radio de la superficie deslizante (Wang & Li, 2009).

Por lo anterior se justifica profundizar en el tema y su aplicación en Colombia teniendo en cuenta que más del 80% de la población colombiana se localiza en zona de convergencia de placas tectónicas, expuesta a una amenaza sísmica entre intermedia y alta (Oviedo & Duque, 2009b). El daño o colapso de las construcciones durante y después de un sismo es la mayor causa de víctimas, disturbios, pérdidas económicas, así que es indispensable diseñar y construir las edificaciones para que resistan eventos sísmicos grandes sin colapsar y eventos sísmicos recurrentes sin daños en la estructura (Oviedo & Duque, 2006).

---

## **1. Objetivos**

### **1.1. Objetivo general**

Describir el comportamiento de los aisladores tipo péndulo de fricción en la protección sísmica de edificaciones y su posible aplicación en Colombia.

### **1.2. Objetivos específicos**

1. Realizar una revisión de literatura sobre los aisladores sísmicos tipo péndulo de fricción.
2. Analizar con enfoque crítico la literatura consultada y la posible aplicación al caso colombiano.

## **2. Alcance**

El alcance del trabajo se define según el reglamento general de posgrado (acuerdo 075 de 2013 del CS) que estipula la realización un trabajo de grado individual en la modalidad de monografía, entendiendo por monografía un texto argumentativo, con función informativa, que presenta y organiza los datos, obtenidos de varias fuentes sobre una determinada temática, y analizados con una visión crítica.

---

### 3. Comportamiento sísmico de edificaciones

#### 3.1. Estructura

Como puede apreciarse en la Figura 1, una estructura perfectamente rígida tendrá un período de cero, cuando el suelo se mueva, la aceleración en la estructura será igual a la aceleración del terreno, habrá un desplazamiento relativo cero entre la estructura y el suelo. Si un edificio es perfectamente flexible tendrá un período infinito, cuando el suelo debajo de la estructura se mueva, habrá una aceleración cero inducida en la estructura, el desplazamiento relativo entre la estructura y el suelo será igual al desplazamiento del suelo. La estructura no se moverá, el suelo lo hará (Kelly, 2001).

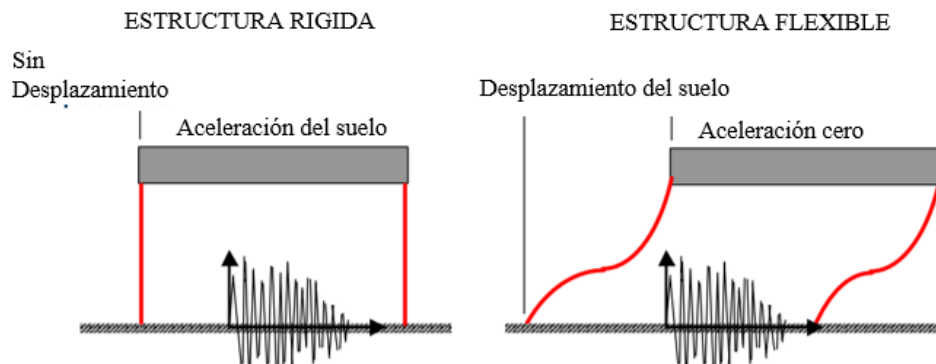


Figura 1. Transmisión de movimientos del suelo. Adaptado de (Kelly, 2001).

Todas las estructuras reales no son ni perfectamente rígidas ni perfectamente flexibles, por lo que la respuesta a los movimientos del terreno se encuentra entre estos dos extremos, como se muestra en la Figura 2.

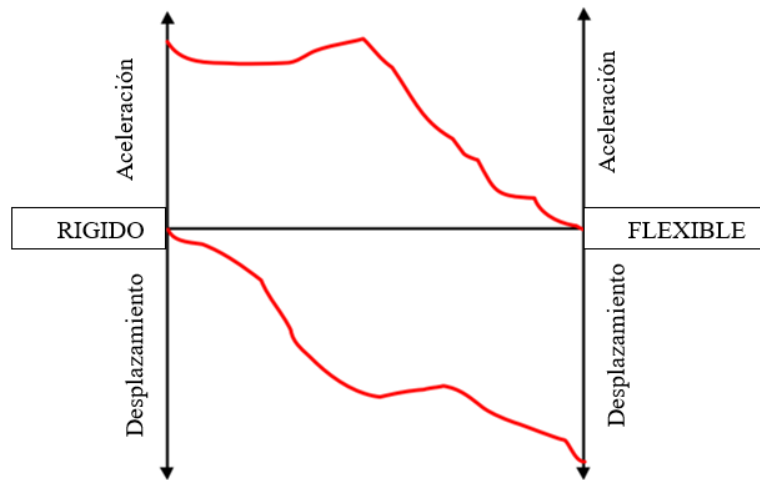


Figura 2. Aceleración y desplazamiento de la estructura. Adaptado de (Kelly, 2001).

Teniendo en cuenta que la posible aplicación sería la ciudad de Bucaramanga donde las tipologías de edificaciones dominantes son el sistema de muros de carga y el sistema de pórtico, se mostraran cuáles son los principales tipos de daño por sismo para este tipo de edificaciones.

Según el reglamento colombiano de construcción sismo resistente o NSR - 10 los sistemas de muros de carga y de pórtico se definen como:

Sistema de muros de carga: es un sistema estructural que no dispone de un pórtico esencialmente completo y en el cual las cargas verticales son resistidas por los muros de carga y las fuerzas horizontales son resistidas por muros estructurales o pórticos con diagonales (NSR, 2010).

Sistema de pórtico: es un sistema estructural compuesto por un pórtico espacial, resistente a momentos, esencialmente completo, sin diagonales, que resiste todas las cargas verticales y fuerzas horizontales (NSR, 2010).

### 3.2. Daños por sismo en edificaciones

Dado que en Colombia no se han presentado eventos sísmicos de gran magnitud en los últimos años que permitan evaluar los daños más comunes de la tipología de edificios dicha anteriormente, se presentan los daños ocurridos en los sismos de Chile 2010, Nueva Zelanda y México 2017. Como se puede observar en la Tabla 1, las consecuencias de no tener suficientes sistemas de control sísmica ocasionan un número elevado de muertes, daños en vivienda y pérdida del PIB.

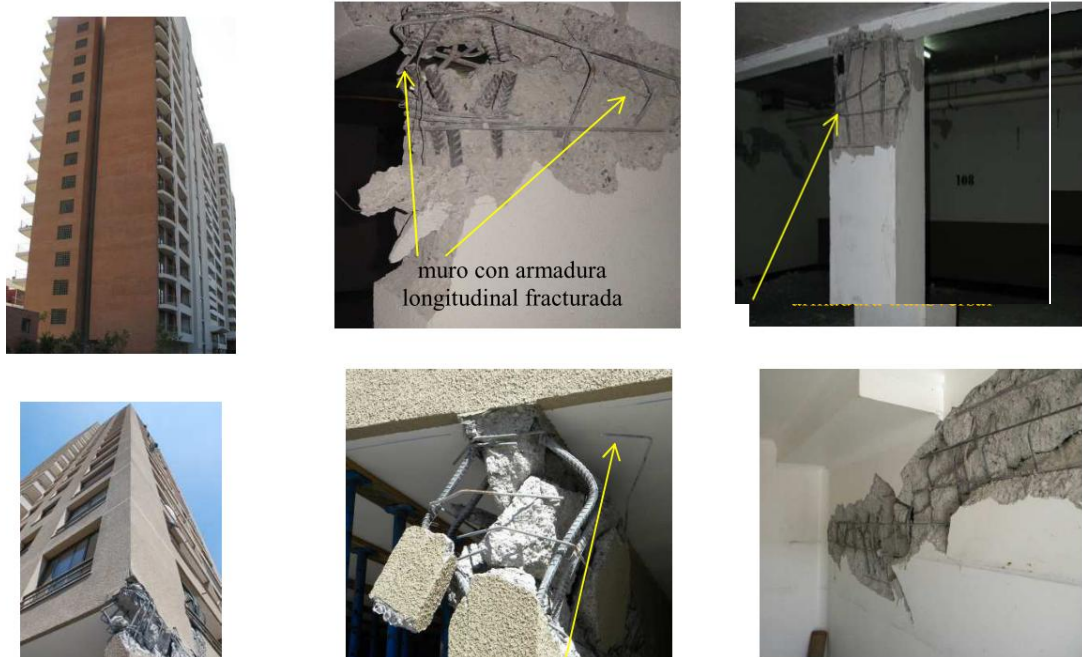
Tabla 1  
*Muertes, daño en vivienda y pérdida de %PIB por sismo*

| País          | Fecha      | Ciudad         | Muertes  | Daño en vivienda | Pérdida (%PIB) | M   |
|---------------|------------|----------------|----------|------------------|----------------|-----|
| Nepal         | 25/04/2015 | Lamjung        | > 8,000  | > 700,000        | 25             | 7.8 |
| Japón         | 11/03/2011 | Sendai         | >15,000  | >400,000         | 4.1            | 9   |
| Nueva Zelanda | 22/02/2011 | Christchurch   | >1,800   | >1,500           | 14             | 6.3 |
| Chile         | 27/02/2010 | Santiago       | >600     | >350,000         | 18             | 6.2 |
| Haití         | 12/01/2010 | Port-au-Prince | >300,000 | >300,000         | 120            | 7   |
| Italia        | 6/04/2009  | L'Aquila       | >300     | >20,000          | 5              | 6.3 |
| China         | 12/05/2008 | Sichuan        | >85,000  | >1,000,000       | 3              | 7.9 |
| Colombia      | 25/01/1999 | Armenia        | >1,100   | >45,000          | 2.3            | 6.4 |
| Japón         | 17/01/1995 | Kobe           | >6,000   | >100,000         | 2              | 6.8 |

Nota: tomado de (Oviedo, 2015).

**3.2.1. Chile 2010.** El 27 de febrero del 2010, un sismo de magnitud Mw 8.8 ocurrió frente a la costa de la región del Maule en Chile. Según el EINC el epicentro se ubicó en las coordenadas 35.909o S y 72.733oW, a una profundidad de 35 km aproximadamente (Almazán, 2010).

Se presentan los daños típicos en edificios con sistema de muros de carga en la ciudad de Santiago y de Concepción.



*Figura 3.* Edificios habitacionales de la ciudad de Santiago con daño severo en el nivel de estacionamientos (Almazán, 2010).

Cerca de 50 edificios entre 10 y 30 pisos de altura, construidos con posterioridad al año 2003, tuvieron serios daños durante el sismo del 27 de febrero. A manera de ejemplo, se presentan daños en cuatro edificios representativos. La Figura 3, muestra dos edificios de aproximadamente 20 pisos declarados inhabitables en la ciudad de Santiago, donde se aprecia la falla de pandeo fuera del plano, aplastamiento de concreto, en la cual se evidencia desprendimiento del concreto y barras longitudinales pandeadas y/o fracturadas (Almazán, 2010).



*Figura 4.* Edificios habitacionales de la ciudad de Concepción con daño severo en el nivel de estacionamientos (Almazán, 2010).

En la Figura 4, se muestran los daños en edificios de la ciudad de Concepción, en la gran mayoría de estos edificios la falla se concentró en uno de los pisos inferiores, permaneciendo el resto prácticamente sin daño. Estas fallas se pueden atribuir, inicialmente, a las siguientes causas: grandes esfuerzos axiales en los muros, debido a la relativamente alta esbeltez en la dirección corta del edificio y al reducido espesor de los muros (típicamente 20 cm en pisos inferiores); falta de confinamiento en los bordes por insuficiencia y/o por mal doblado de estribos (ganchos a 90° y no a 135°); irregularidad vertical por interrupción o disminución del largo de los muros en el nivel de los estacionamientos (Almazán, 2010). En la Figura 5, se presenta dos edificios que colapsaron en el sismo del 27 de febrero de 2010 en la ciudad de Concepción.





*Figura 5.* Edificios de muros de carga colapsados durante el sismo del 27 de febrero (Almazán, 2010).

El daño estructural en muchos edificios de altura media a alta, se atribuyó al diseño y a la deficiencia del detallado. El uso de muros esbeltos, a veces tan delgados como 150 mm, sin elementos de borde, contribuyó a un daño extenso, especialmente cuando estas deficiencias se unieron con condiciones de suelo blando y diseños de plantas irregulares. En las Figura 6, se muestra falla por aplastamiento del concreto, a lo largo de la base del muro y a lo largo de grietas de corte diagonal (Saatcioglu et al., 2012).

La Figura 7, muestra el pandeo del refuerzo vertical después del aplastamiento de concreto en un muro del estacionamiento de Balmaceda en Santiago. En la figura 8, se puede apreciar una columna que falló por corte en el condominio Central Park en Santiago.



*Figura 6.* Daño por aplastamiento en muro (Saatcioglu et al., 2012).



*Figura 7.* Pandeo por aplastamiento en muro de concreto (Naeim et al., 2011).



Figura 8. Daño por cortante en una columna (Saatcioglu et al., 2012).

**3.2.2. México 2017.** El sismo de magnitud 7.1 del 19 de septiembre de 2017 ocurrió aproximadamente a 60 km al suroeste de Puebla, México, y aproximadamente a 120 km al sureste de la Ciudad de México, causando daños significativos e interrupciones a la infraestructura y la sociedad mexicana. Más de 28 millones de personas, 8.6 millones de residencias, 54,000 escuelas y 5700 hospitales fueron afectados directamente por este evento (Franke et al., 2019).

En la Tabla 2, se resumen el número de edificios que resultaron afectados después del sismo del 19 de septiembre, en las Figuras 9, 10 y 11 se muestran algunos de los edificios que colapsaron ante dicho sismo.

Tabla 2

*Número de casos de edificios severamente dañados*

| Zona | Numero de edificios |             |                    |
|------|---------------------|-------------|--------------------|
|      | Colapsados          | Alto riesgo | Seguridad incierta |
| I    | 2                   | 4           | 2                  |
| II   | 9                   | 45          | 52                 |
| IIIa | 15                  | 110         | 58                 |
| IIIb | 12                  | 140         | 125                |

---

|       |    |     |     |
|-------|----|-----|-----|
| IIIc  | 0  | 36  | 3   |
| IIId  | 0  | 5   | 1   |
| Total | 38 | 340 | 241 |

---

Nota: adaptado de (Franke et al., 2019).



*Figura 9.* casa colapsada (The New York Times, 2017).



*Figura 10.* Edificio colapsado México (The New York Times, 2017).





*Figura 11.* Colapso de edificio, el más grave que se haya visto desde el sismo de 1985 (BBC, 2017).

**3.2.3. Nueva Zelanda 2011.** Un fuerte sismo con una magnitud de 7,1 ocurrió el 4 de septiembre de 2010 a las 4.35 a.m., hora estándar de Nueva Zelanda (NZST) en la Isla Sur de Nueva Zelanda. El epicentro estaba aproximadamente a 37 km al oeste de Christchurch. El 22 de febrero de 2011 a las 12.51 NZST después de varios miles de réplicas, Christchurch fue golpeada nuevamente por una fuerte réplica. Este evento tuvo un momento de magnitud de 6.3. Sin embargo, el epicentro se ubicó a unos 6 km del Distrito Comercial Central de Christchurch (CBD) en Port Hills, cerca de la ciudad de Lyttelton (Chouw & Hao, 2012).

Desde la Figura 12 hasta la Figura 15 se evidencian ejemplos de daños en algunas de las edificaciones de Christchurch, Nueva Zelanda.



*Figura 12.* Poco detalle en la conexión de la columna (Clifton, Bruneau, Macrae, Leon, & Fussell, 2011).



*Figura 13.* El edificio Pico Wholefood fue seriamente afectado por el sismo (Wikinews, 2011).

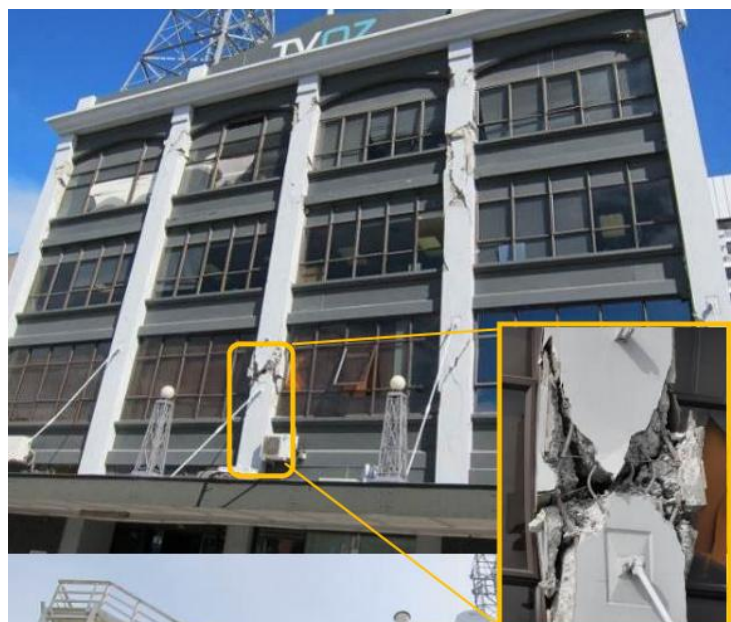


*Figura 14.* Casa colapsada en el centro (Wikinews, 2011).



*Figura 15.* Daño en columnas (Cole, Dhakal, & Turner, 2012).

La Figura 16, muestra un edificio de 4 con porticos de concreto reforzado, de la década de 1950 con daños severos en las columnas, el edificio está reforzado con barras redondas lisas. Como se nota en la Figura 16, las columnas que fallaron por cortante tienen un refuerzo transversal insignificante.



*Figura 16.* Fallas severas por cortante en la columna (Kam, Pampanin, & Elwood, 2011).

La Figura 17 muestra el pandeo y el aplastamiento de un muro con ligero refuerzo longitudinal y confinamiento.



*Figura 17. Falla por pandeo y aplastamiento de un muro (Kam et al., 2011)*

#### **4. Sistemas de protección sísmica**

Las vibraciones estructurales producidas por sismos o viento pueden ser controladas mediante sistemas de control estructural. Estos sistemas son métodos alternos para disminuir las sollicitaciones (fuerzas internas) de una estructura, mejorando sus propiedades dinámicas con base en esquemas de control pasivo, activo semiactivo e híbrido, como se muestran en la Tabla 3 (Gómez, Marulanda, & Thomson, 2008).

Los sistemas de protección sísmica se desarrollaron con el objetivo de reducir el daño estructural asociado principalmente a los sismos. Estas metodologías complementan las técnicas



---

tradicionales de diseño al introducir los dispositivos de control adicionales que deben disipar la mayor parte de la energía de producida por los sismos y después de un evento sísmico fuerte, estos dispositivos fácilmente se reemplazan sin arriesgar la estabilidad y la funcionalidad de la edificación (Oviedo & Duque, 2009a).

La aplicación de estrategias de protección sísmica para proteger las estructuras de los sismos se está volviendo cada vez más popular y más demandada en las regiones propensas a la actividad sísmica, en particular, varios países de América Latina. El objetivo principal de cualquier sistema de protección sísmica siempre debe ser la seguridad de las personas y garantizar que la capacidad de estructuras claves como puentes o edificios importantes de sobrevivir a un sismo y permanecer en servicio inmediatamente después para una respuesta de emergencia efectiva. Es probable que el costo asociado con la fabricación de elementos críticos de la infraestructura de una región a prueba de sismos sea insignificante en comparación con el impacto económico de la pérdida de servicio después de un sismo y durante la larga fase de reconstrucción (Galindo et al., 2017).

*“A partir del final del siglo XIX y comienzos del siglo XX, los estudios por desarrollar mejores sistemas de protección sísmica se intensifican especialmente en Europa, Asia y Estados Unidos, como resultado se desarrollaron sistemas novedosos de disipación y aislamiento sísmico”* (Condoy & Williams, 2013). 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 Ecuador, Argentina y Colombia se estén vinculando a realizar estudios teóricos y prácticos de implementación de las técnicas de control sísmico (Toloza, 2019).

Aunque ya han transcurrido más de tres décadas desde que las técnicas de control de respuesta sísmica se empezaron a implementar como alternativa para aliviar los efectos de sismos y vientos

---

a las edificaciones, en Colombia, país en el cual el 80% de su población vive en zonas de amenaza sísmica alta, todavía no tienen acogida y las razones del rechazo radican en: la falta de confianza en el comportamiento sísmico de edificaciones con técnicas de control de respuesta, el sobre costo inicial del proyecto, el desconocimiento por parte de los diseñadores de las metodologías de diseño estructural, la falta de normalización en los métodos de diseño y en especificaciones de los dispositivos de control (Oviedo & Duque, 2009b).

Tabla 3

*Clasificación de los sistemas de protección sísmica*

| <b>Sistema de control</b> | <b>Tipo</b>                | <b>Tipo</b>                         | <b>Dispositivo</b>                                  |
|---------------------------|----------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| Control pasivo            | Aislamiento sísmico        | Mecanismos deslizantes o de rodillo | Apoyo de rodillos                                   |
|                           |                            |                                     | Apoyo de placa deslizante, tipo péndulo, basculante |
|                           |                            |                                     | Capa deslizante                                     |
|                           |                            | Elementos flexibles                 | Otros                                               |
|                           |                            |                                     | Elastómero de multicapas                            |
|                           | Disipación de energía      | De tipo histérico                   | Dispositivo flexible                                |
|                           |                            |                                     | Otros                                               |
|                           |                            |                                     | Acero                                               |
|                           |                            | De tipo friccionante                | Plomo                                               |
|                           |                            |                                     | Otros                                               |
| Control semiactivo        | Efecto de masa adicional   | De tipo fluido                      | Hidráulico                                          |
|                           |                            | De tipo viscoelástico               | Viscoso                                             |
|                           |                            |                                     | Otros                                               |
|                           |                            |                                     |                                                     |
|                           | Otro                       | De masa y resorte                   |                                                     |
|                           |                            | De tipo pendular                    |                                                     |
| Control semiactivo        | Control de amortiguamiento | Vibración de liquido                |                                                     |
|                           |                            | Otros                               |                                                     |
|                           | Control de rigidez         | Sistema de amortiguamiento variable | De tipo hidráulico                                  |
|                           |                            | Sistemas de rigidez variable        | Otro                                                |
|                           |                            |                                     | Riostra                                             |
|                           |                            |                                     | Otro                                                |

|                          |                   |                                 |
|--------------------------|-------------------|---------------------------------|
| Control activo e híbrido | Otro              |                                 |
|                          | Efecto de masa    | Amortiguamiento activo de masa  |
|                          |                   | Amortiguamiento híbrido de masa |
|                          | Control de fuerza | Tendón activo                   |
|                          | Otro              | Otro                            |

Nota: tomado de (Oviedo & Duque, 2006).

#### 4.1. Activo e híbrido

El principio fundamental de los sistemas activos es que incluyen un algoritmo de control y un procesador de información, así que requieren de uno o varios computadores que deben funcionar permanentemente, además necesitan una protección adecuada para garantizar su funcionamiento en el momento de ocurrencia de un sismo; ya que debe tener un suministro constante de energía y es un problema difícil de resolver. En un sistema de tipo activo, la estructura es monitoreada constantemente, lo que permite modificar la respuesta de los dispositivos en tiempo real, según el nivel de la excitación sísmica (Genatios & Lafuente, 2016). En la Figura 18, se encuentran las representaciones de un sistema de control activo por efecto de masa y por efecto de rigidez.

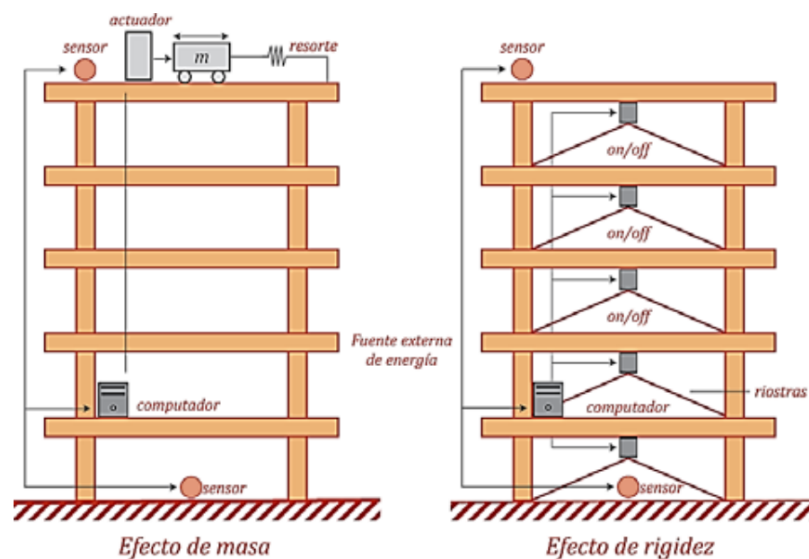


Figura 18. Sistema de control activo (Genatios & Lafuente, 2016).

Los sistemas de control híbrido son sistemas que emplean una combinación de sistemas pasivos y activos, se muestra el esquema de funcionamiento de un sistema de control híbrido en la Figura 19. Por ejemplo, una estructura acondicionada con amortiguadores viscoelásticos y un amortiguador activo de masa en la parte superior del edificio; o una estructura aislada en la base con actuadores controlados activamente para mejorar su comportamiento (Gómez et al., 2008).

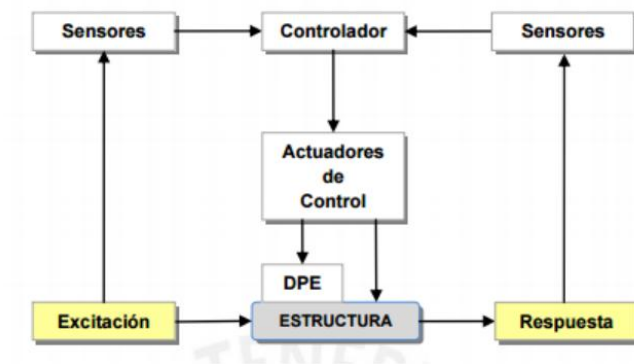


Figura 19. Esquema de funcionamiento de un sistema de control híbrido (Laverde, 2017).

#### 4.2. Semiactivo

Son una clase de sistemas de control activo en los cuales, la energía externa requerida es de menor orden de magnitud en comparación a los sistemas convencionales. Normalmente los dispositivos de control semiactivo no suministran energía mecánica al sistema estructural (incluyendo estructura y actuadores) (Gómez et al., 2008). Los sistemas semiactivos ofrecen ventajas sobre los sistemas de control activo dado que, no requieren de la adaptación de grandes fuentes de energía, de hecho, muchos de ellos pueden operar con baterías las cuales mantienen su funcionamiento durante eventos sísmicos cuando la principal fuente de energía eléctrica puede fallar (Pinzón & Martínez, 2014). En la Figura 20, se muestra la representación de un sistema semiactivo de protección sísmica.

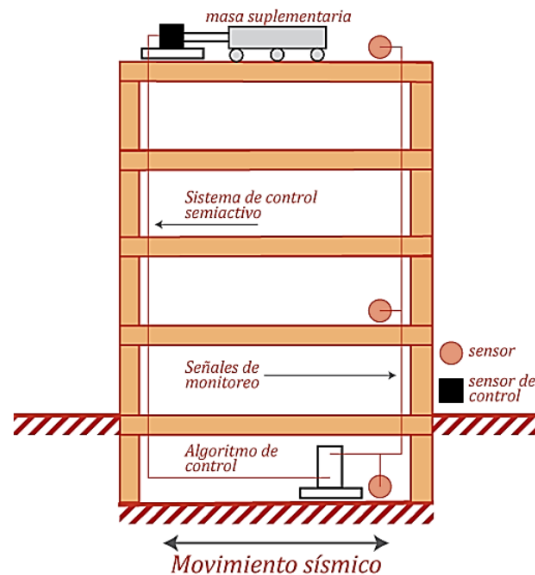


Figura 20. Sistemas semiactivos de protección sísmica (Genatios & Lafuente, 2016).

### 4.3. Pasivo

En los sistemas de control pasivo de estructuras generalmente se usan dispositivos sencillos con un comportamiento inelástico estable cuando están sometidas a las cargas sísmicas. Los dispositivos pueden mejorar el comportamiento sismorresistente de la estructura, si han sido contemplados de manera correcta en el diseño estructural y si se incluyen las adecuadas consideraciones sobre las características mecánicas de la estructura, de los dispositivos de control y del suelo (Genatios & Lafuente, 2016). En la Figura 21, se presenta el esquema de funcionamiento de un sistema de control pasivo.



Figura 21. Mecanismo de operación del sistema de control pasivo (Toloza, 2019).

En la Tabla 4, se presentan las ventajas y desventajas de los diferentes tipos de sistemas de control pasivo para la protección sísmica dentro de las prácticas de diseño y construcción en Colombia.

Tabla 4

*Aspectos deseables para el uso de dispositivos de control pasivo de respuesta sísmica dentro de las prácticas de diseño y construcción colombianas actuales*

| Aspectos deseables                                                                                                                            | Control pasivo    |                        |                |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|------------------------|----------------|
|                                                                                                                                               | Aislamiento basal | Disipadores histéricos | Masa adicional |
| Bajo costo de instalación y puesta en obra de los dispositivos de control                                                                     |                   | *                      |                |
| Larga vida útil de los dispositivos                                                                                                           | *                 | *                      | *              |
| Bajo costo de mantenimiento de los dispositivos de control                                                                                    | *                 | *                      | *              |
| Bajo costo de reemplazo de los dispositivos de control                                                                                        |                   | *                      |                |
| Baja probabilidad de reemplazo postsismo de los dispositivos de control                                                                       | *                 |                        | *              |
| Bajo costo de fabricación de los dispositivos de control                                                                                      |                   | *                      |                |
| Instalación simple en obra de los dispositivos de control                                                                                     |                   | *                      |                |
| Reducción del daño estructural por sismo                                                                                                      | *                 | *                      | *              |
| Simplicidad en el uso para la rehabilitación o reforzamiento de estructuras existentes                                                        |                   | *                      | *              |
| Simplicidad en la implementación en sistemas de pórticos                                                                                      | *                 | *                      | *              |
| Simplicidad en la implementación en sistemas de muros de carga                                                                                |                   | *                      | *              |
| No requiere mano de obra altamente calificada para la instalación de los dispositivos de control                                              |                   | *                      |                |
| Alto control de daño en contenidos                                                                                                            | *                 |                        | *              |
| Bajo impacto en las prácticas de construcción actuales                                                                                        |                   | *                      |                |
| Fácil consecución de materiales necesarios para la fabricación de los dispositivos en el país                                                 |                   | *                      |                |
| Baja interrupción del continuo funcionamiento de estructuras indispensables durante la instalación o reemplazo de los dispositivos de control | *                 | *                      | *              |

Nota: tomado de (Oviedo & Duque, 2009a).

---

#### 4.4. Aislamiento sísmico

El concepto de aislamiento sísmico es: reducir las fuerzas inducidas por el sismo en una estructura incrementando su periodo fundamental o agregando amortiguamiento al sistema o mediante la combinación de estos dos parámetros (Moreno et al., 2015).

La principal meta del aislamiento sísmico es lograr que la energía transmitida por un sismo a la estructura pueda ser disipada, utilizando elementos flexibles horizontalmente, llamados aisladores sísmicos. Los sistemas de aislamiento hacen que la frecuencia fundamental del sistema sea menor que la frecuencia de la estructura con base fija, esta disminución en la frecuencia de la estructura, indica que el periodo aumenta, ocasionando un incremento en el desplazamiento lateral. Instalar un sistema de aislamiento, ocasiona que los esfuerzos producidos por un sismo sean más pequeños, haciendo que estructura sobre los aisladores se mueva en sentido lateral prácticamente como un cuerpo rígido (Betancur, Galvis, & Rosillo, 2014).

El aislamiento sísmico ha tenido una gran aceptación en el diseño sismo resistente de estructuras nuevas como también en el reforzamiento de estructuras, ya que el concepto de aislamiento está orientado a una reducción significativa de cargas dinámicas, lo contrario al diseño convencional que está basado en un aumento de resistencia (Villavicencio, 2015).

Para el diseño se debe asegurar una brecha alrededor del edificio para permitir el desplazamiento, detallar adecuadamente las conexiones de servicios públicos para evitar daños relacionados con el desplazamiento, evitar las amplificaciones de torsión causadas por excentricidades en la superestructura y el diseño debe considerar una cierta resistencia a los pequeños sismos y la acción del viento (Ealangi, 2010).

---

En el aislamiento sísmico de base se instalan dispositivos, en el nivel más bajo del edificio, como se muestra en la Figura 22, para que absorban de manera parcial, la energía ocasionada por el sismo antes de que sea transmitida a la superestructura. Entre los dispositivos empleados en la técnica de aislamiento sísmico en la base se cuenta con los aisladores flexibles y los aisladores de fricción deslizantes o basculantes, combinados con amortiguadores (Oviedo & Duque, 2006).

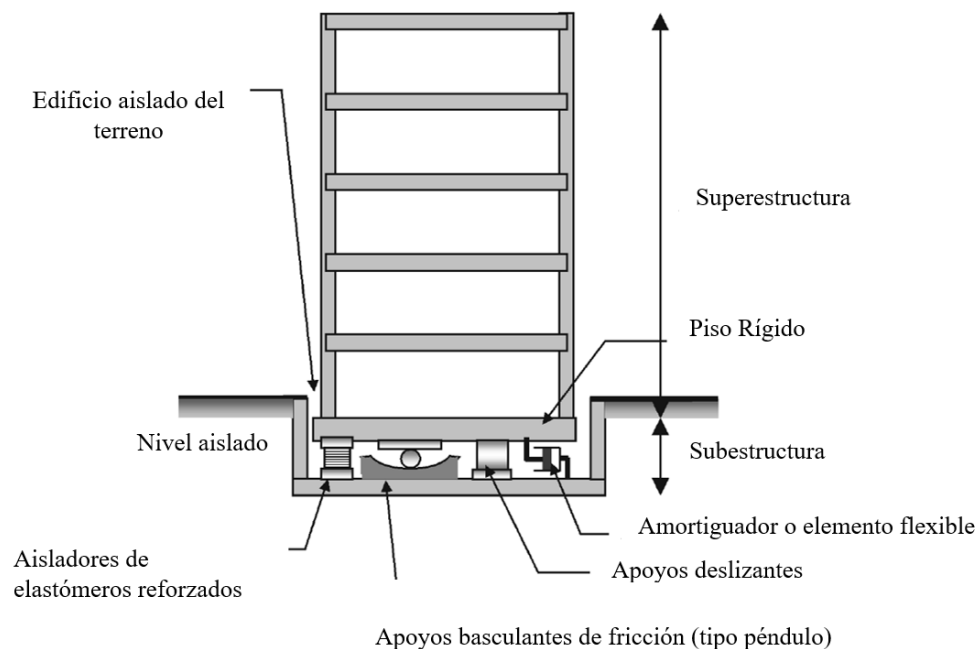


Figura 22. Técnica de aislamiento sísmico en la base, tomado de (Oviedo & Duque, 2006).

El aislamiento sísmico tiene como ventaja principal que las estructuras mantengan su funcionalidad antes, durante y después de los sismos, protegiendo a los usuarios, además de asegurar que las vías a las poblaciones afectadas sigan en completo funcionamiento para atender eventuales emergencias (Betancur et al., 2014).

El aislamiento de una estructura da como resultado una respuesta estructural controlada con aceleraciones y fuerzas transmitidas a la estructura reducida. La reducida demanda sísmica permite que la superestructura permanezca elástica, o casi elástica, después de un evento de nivel de diseño.



Además, el aislamiento de una estructura contribuye a reducir la probabilidad de daños en equipos sensibles al desplazamiento y sensibles a la aceleración, componentes no estructurales y contenido de la estructura (Calvi & Calvi, 2018).

El sistema de aislamiento sísmico de base desacopla el edificio o la estructura de los componentes horizontales del movimiento del suelo al interponer elementos estructurales con una baja rigidez horizontal entre la estructura y la cimentación. Esto le da a la estructura una frecuencia fundamental que es mucho más baja que su frecuencia de base fija y las frecuencias del movimiento del suelo. Este cambio del período natural causa una caída en la aceleración espectral para el movimiento típico del sismo, como se evidencia en la Figura 23. La amortiguación por la disipación de energía influye en el desplazamiento y la respuesta de aceleración como se evidencia en la Figura 24 (Ealangi, 2010).

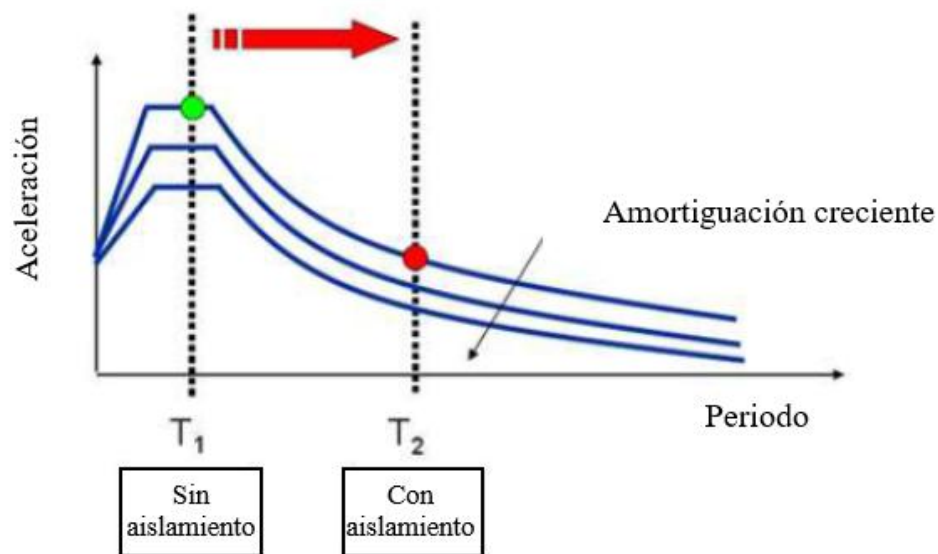


Figura 23. Efectos del aislamiento de la base en la aceleración espectral (Ealangi, 2010).

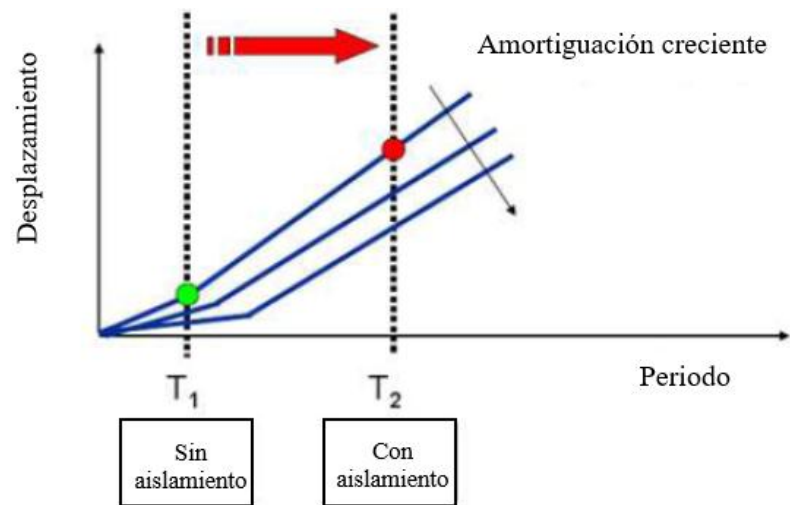


Figura 24. Efectos del aislamiento de base sobre el desplazamiento lateral (Ealangi, 2010).

Las condiciones del suelo tienen un gran impacto en la confiabilidad del aislamiento de base. En condiciones de suelo rígido, se logra una reducción significativa en la aceleración espectral, mientras que en suelo blando ocurre lo contrario como lo muestra la Figura 25.

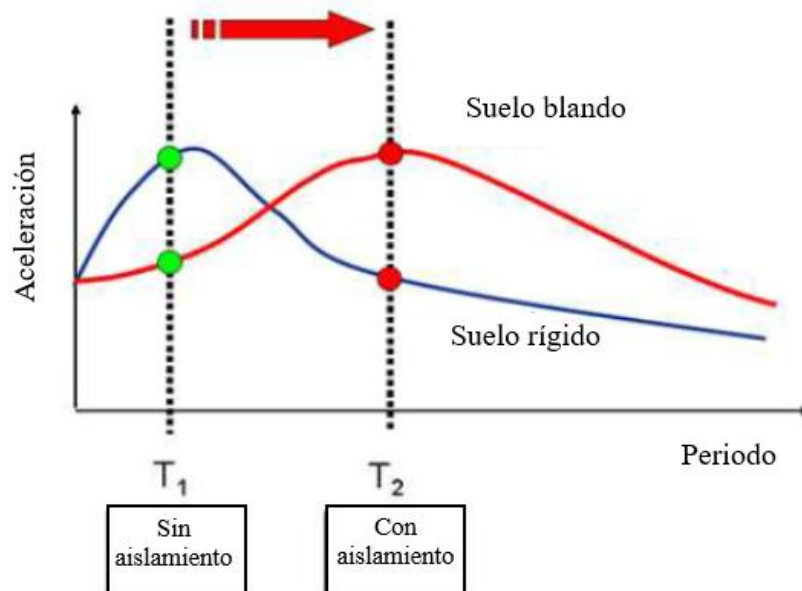


Figura 25. Efectos del aislamiento de base en diferentes condiciones de suelo (Ealangi, 2010).

#### 4.4.1. Componentes de un sistema de aislación sísmico

**4.4.1.1. Interfaz de Aislamiento.** *“Es el límite imaginario que existe entre la parte superior de la estructura, la cual está aislada, y la inferior que se mueve rígidamente con el terreno”* (Meza & Sanchez, 2010).

**4.4.1.2. Unidad de aislamiento.** *“Es un elemento estructural muy flexible en la dirección horizontal ante cargas sísmicas, y muy rígido en la dirección vertical ante carga gravitacionales”* (Meza & Sanchez, 2010).

**4.4.1.3 Sistema de aislamiento.** *“Es el conjunto de sistemas estructurales que incluye a todas las unidades de aislamiento, disipadores de energía y sistemas de restricción de desplazamientos”* (Meza & Sanchez, 2010).

En la Figura 26, se presentan los componentes de un sistema de aislamiento anteriormente mencionados.

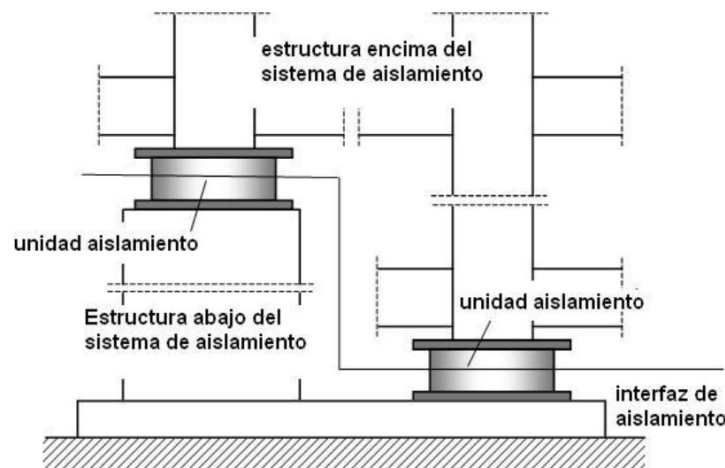


Figura 26. Componentes de un sistema de aislamiento (Meza & Sanchez, 2010).

**4.4.2. Formulación de energía.** La energía de entrada debida al movimiento del suelo se disipa a través de mecanismos de energía no conservativos en la estructura. La energía de entrada restante se convierte en una combinación de energía cinética y potencial, como lo expresa la Ecuación 1. Durante la fase de no deslizamiento no hay movimiento relativo en el nivel del aislador y, por lo tanto, toda la energía de entrada se transmite a la estructura, la energía de entrada en la fase deslizante se puede definir como trabajo realizado por la fuerza de aislamiento (fuerza de recuperación + fuerza de fricción) debido a los desplazamientos del suelo. La definición de energía de entrada en esta fase es similar a la energía de entrada absoluta ya que la fuerza del aislador es idéntica a la fuerza de inercia. Debido al deslizamiento, parte de la energía de entrada se disipa a través de la fricción de deslizamiento y la energía restante se retiene en diferentes formas de energía conservadora (Murnal & Sinha, 2002).

$$E_k + E_r + E_s + E_\xi + E_\mu = E_i \quad (\text{Ecuación 1})$$

$E_k$  = es la suma de las energías cinéticas absolutas de todas las masas.

$E_r$  = energía potencial restaurable debido al aumento de la estructura a lo largo de la superficie deslizante del aislador.

$E_s$  = energía elástica debido a deformaciones estructurales.

$E_\xi$  = energía disipada debido a la amortiguación estructural.

$E_\mu$  = energía disipada debido a fricción de deslizamiento.

El término  $E_i$  es la energía impuesta por las cargas dinámicas de sismo y viento, expresada en la Ecuación 2 (Oviedo & Duque, 2006)

---

$$E_{is} + E_{iw} = E_i \quad (\text{Ecuación 2})$$

$E_{is}$  = energía impuesta por el sismo.

$E_{iw}$  = energía impuesta por el viento.

Un aislador intenta reducir la energía de entrada  $E_i$ , mientras que un disipador de energía intenta disipar una gran parte de la energía  $E_i$  para un sistema de protección ideal se incorporaría efectivamente estas dos características (Mural & Sinha, 2002).

## 5. Aspectos normativos

### 5.1. Colombia

Colombia al no disponer de una normativa propia para el diseño y construcción de estructuras aisladas sísmicamente en la base recomienda emplear normas estadounidenses (FEMA 450 y ASCE 7-05). La norma colombiana estipula lo siguiente sobre aislamiento sísmico en edificaciones (NSR, 2010):

#### A.3.8 — ESTRUCTURAS AISLADAS SÍSMICAMENTE EN SU BASE

A.3.8.1 — Se permite el empleo de estructuras aisladas sísmicamente en su base, siempre y cuando se cumplan en su totalidad los requisitos al respecto de uno de los dos documentos siguientes:

(a) “NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings — Provisions and Commentary”, 2003 Edition, Federal Emergency Management Agency, FEMA

---

---

450, Building Seismic Safety Council, National Institute of Buildings Sciences, Washington, D.C., USA, 2004,

(b) “Minimum Design Loads for Building and Other Structures”, ASCE/SEI 7-05, Structural Engineering Institute of the American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia, USA, 2006

A.3.8.2 — En el diseño y construcción de estructuras aisladas sísmicamente en su base, se deben cumplir los requisitos de los Artículos 10 y 11 de la Ley 400 de 1997, asumiendo el diseñador estructural y el constructor las responsabilidades que allí se indican.

A.3.8.3 — La construcción de una edificación que utilice sistemas de aislamiento sísmico en su base debe someterse a una supervisión técnica permanente, como la describe el Título I.

### Apéndice A-3

Aunque no aparece explícitamente en el Reglamento, la metodología del análisis no lineal estático también constituye la base para los procedimientos de la fuerza lateral equivalente contenidos en las disposiciones para estructuras aisladas en la base y estructuras con disipadores de energía.(NSR, 2010)

El uso en el país de una normativa extranjera sin un análisis previo de su aplicabilidad al contexto local, puede implicar serias inconsistencias técnicas y sobrecostos que frenen la expansión del aislamiento sísmico, ya que no se tiene en cuenta los aspectos técnicos ni la sismicidad del país (Piscal & López, 2018).

## 5.2. Internacional

Algunos países, como Japón, China, Italia, USA, Chile, México, cuentan con normativa propia para aislamiento de base, como se resume en la Tabla 5, en las cuales se presentan discrepancias

---

en aspectos de gran relevancia como la definición de la amenaza, las metodologías de análisis y diseño, el desempeño requerido a las estructuras, y las exigencias de revisión de los diseños, entre otros. Estos factores implican una variación económica en la implementación del aislamiento (Piscal & López, 2016).

Tabla 5  
*Normativas internacionales*

| <b>País</b> | <b>Normativa</b>                             |
|-------------|----------------------------------------------|
| Japón       | BSLEO 2000, Notificación No. 1457 y No. 2009 |
| China       | GB50011-2010                                 |
| Italia      | NTC-2008                                     |
| USA         | ASCE 7-10                                    |
| Chile       | NCh 2745-2013                                |

Nota: tomado de (Piscal & López, 2016).

## 6. Aislamiento con péndulo de fricción

### 6.1. Antecedentes

La primera obra construida con aislación sísmica fue el Partenón en el año 440 A.C. en la cual las columnas podían desplazarse verticalmente para permitir una rotación en su base y poder disipar energía mediante la fricción y deformación inelástica de un elemento de plomo que se incorporó como protección de los elementos de madera (Aguiar, Almazán, Dechent, & Suárez, 2008).

El péndulo de fricción representó el primer aislador deslizante práctico en el que la fuerza de restauración se proporciona mediante la gravedad. Con el aislamiento sísmico tipo péndulo de fricción se encontraron aplicaciones extensas y revolucionaron el aislamiento sísmico con su habilidad de permitir desplazamientos, cargas verticales y cortantes muy grandes. El primer estudio experimental de mesa vibratoria se realizó en 1987 en la Universidad de California,

utilizando un modelo altamente versátil de dos pisos (peso en el rango de 80kN a 120 kN) en el que se estudiaron muchos efectos, incluida la flexibilidad, distribución de masa, asimetría y efectos de movimiento vertical del suelo en la estructura. Poco después, se realizó otro estudio en la Universidad Estatal de Nueva York en Buffalo utilizando un modelo de marco de momentos de acero de seis pisos y 230 kN (Makris, 2019).

Los aisladores tipo péndulo de fricción se instalan entre una estructura y su base para protegerla de los daños debidos a sismos. Los cojinetes reducen las cargas laterales y los movimientos de agitación transmitidos a la estructura. Pueden proteger las estructuras, su contenido durante sismos fuertes de magnitud 8 (Earthquake Protection Systems, 2005).



*Figura 27.* La estructura aislada permanece intacta después de 58 sismos incluyendo cargas sísmicas de magnitud 8 (Earthquake Protection Systems, 2005).



En la Figura 27 se presenta un modelo a escala de una estructura sometida a sismos de magnitud 8, con su base aislada, la cual no presenta daños. En la Figura 28, se presenta el mismo modelo a escala sin su base aislada, sometido a sismos de magnitud 5, 6 y 7, en el cual se evidencian los daños.

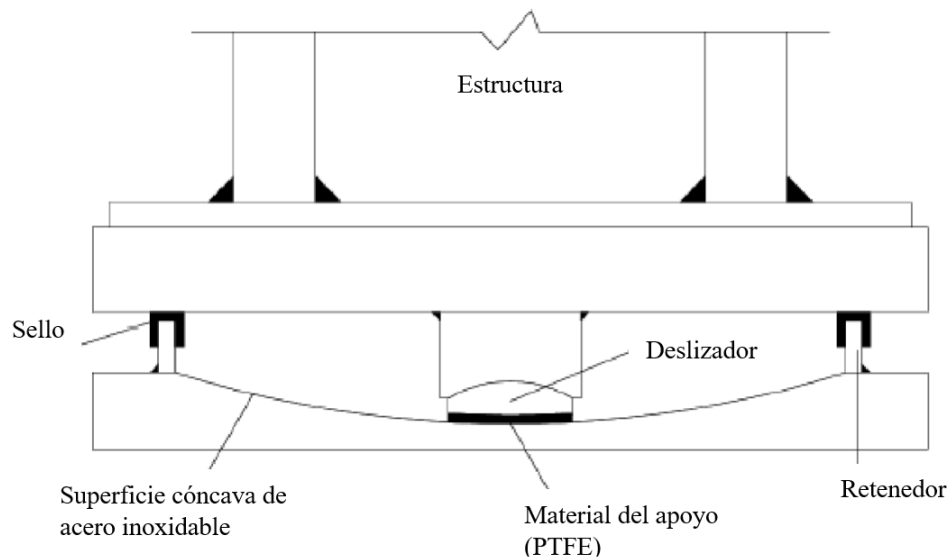


*Figura 28.* La estructura no aislada falla después de 3 sismos de magnitudes 5, 6 y 7, respectivamente (Earthquake Protection Systems, 2005).

## 6.2. Descripción del sistema

El aislador de péndulo de fricción (FPS) combina una acción deslizante en conjunto con una fuerza restauradora determinada por la geometría del dispositivo, como se puede observar en la Figura 29. El aislador FPS está compuesto por un deslizador articulado en el que descansa una superficie de acero inoxidable. La parte del deslizador en contacto con esta superficie se encuentra recubierta

por un material con bajo coeficiente de rozamiento, mientras que la otra parte del aislador se recubre en acero inoxidable y descansa sobre una cavidad esférica, también recubierta con el mismo material antideslizante (Valerio, 2015).



*Figura 29. Sistema de péndulo de fricción (Valerio, 2015).*

Durante un sismo, el patín articulado se desliza en la superficie cóncava generando en la estructura soportada movimientos de péndulo, como se muestra en la Figura 30 y en la Figura 31. La fuerza de fricción dinámica genera el amortiguamiento necesario para absorber la energía logrando que las fuerzas y movimientos laterales transmitidos a la edificación sean reducidos (Moreno et al., 2015). A medida que el deslizador se desplaza sobre la superficie cóncava produce un levantamiento de la masa soportada, lo que provee la fuerza restauradora del sistema (Valerio, 2015).

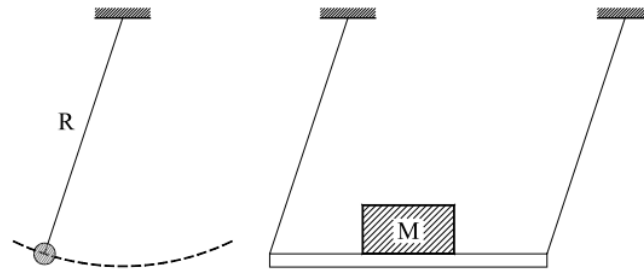


Figura 30. Movimiento pendular (Moreno et al., 2015).

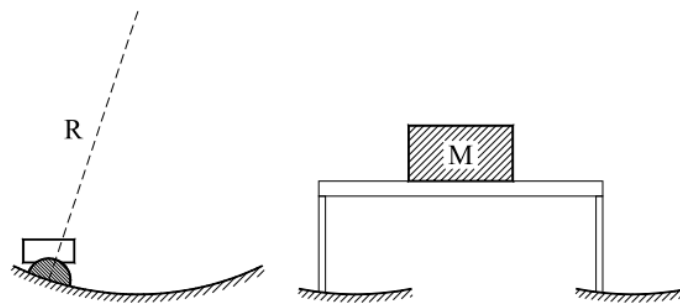


Figura 31. Movimiento de péndulo deslizante (Moreno et al., 2015).

Los aisladores tipo péndulo de fricción utilizan las características de un péndulo para alargar el período natural de la estructura aislada con el fin de evitar las mayores fuerzas sísmicas. El período del rodamiento se selecciona simplemente eligiendo el radio de curvatura de la superficie cóncava. Es independiente de la masa de la estructura. Los movimientos de torsión de la estructura se minimizan porque el centro de rigidez de los cojinetes coincide automáticamente con el centro de masa de la estructura soportada (Earthquake Protection Systems, 2005).

En los sistemas de péndulo de fricción las propiedades no se afectan con el paso de los años ni la temperatura. El bajo perfil de los apoyos, su alta resistencia, y su gran rigidez vertical reducen los costos de instalación. Estos apoyos ofrecen propiedades que pueden satisfacer diversos

---

requerimientos en puentes, edificios, proporcionan resistencia y estabilidad más allá de la suministrada por los elastómeros (Moreno et al., 2015).

**6.2.1. Ecuaciones de los aisladores tipo péndulo de fricción.** El diseño de estos elementos se simplifica por el hecho de que el periodo del aislador, la capacidad de carga vertical, el amortiguamiento, la capacidad de desplazamiento y su capacidad a tensión pueden seleccionarse de forma independiente (Moreno et al., 2015). El período del aislador se controla mediante la selección del radio de curvatura,  $R$ , de la superficie cóncava (Earthquake Protection Systems, 2005).

El periodo natural del aislador está definido por la Ecuación 3.

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{R}{g}} \quad (\text{Ecuación 3})$$

Donde  $g$  es la aceleración de la gravedad. Este periodo del péndulo, es el de una masa deslizándose en los aisladores FPS y el periodo aislado de vibración de una estructura relativamente rígida apoyada sobre FPS, el cual se convierte en activo una vez que el nivel de la fuerza de fricción de los aisladores es excedido (Zayas, Low, & Mahin, 1990).

Cómo puede observarse, es independiente de la masa de la estructura.

La rigidez lateral del aislador ( $k_b$ ) que proporciona la capacidad de restauración del sistema está dada por la Ecuación 4.

$$K_b = \frac{W}{R} \quad (\text{Ecuación 4})$$

---

La rigidez es directamente proporcional al peso soportado, es una propiedad única e importante del FPS el cual tiene como efecto favorable en la respuesta a torsión de la estructura ya que el centro de rigidez lateral de las conexiones FPS coincide con el centro de masa (Zayas et al., 1990).

De la Figura 32 y de la Figura 33, se deducen las ecuaciones desde la 5 hasta la Ecuación 10, se muestran los parámetros que definen el comportamiento de los aisladores tanto en análisis como en diseño formando parte de un sistema de resistencia sísmica y disipación de energía (Moreno et al., 2015).

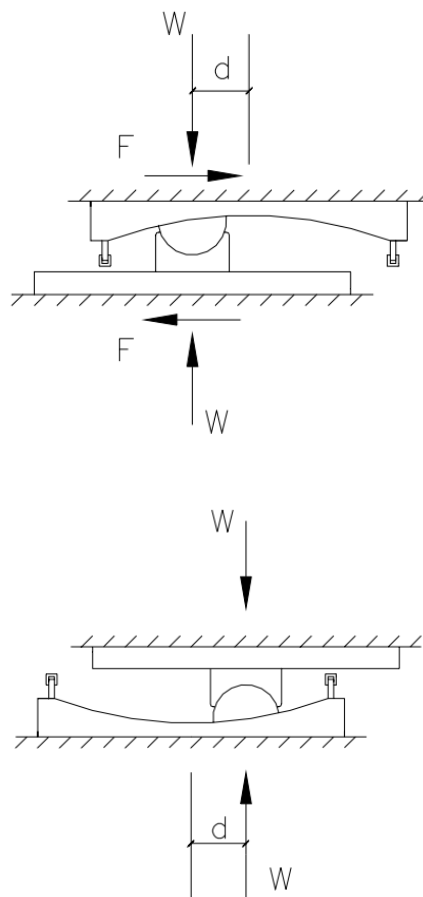


Figura 32. Deformada del aislador tipo péndulo de fricción (Earthquake Protection Systems, 2005).

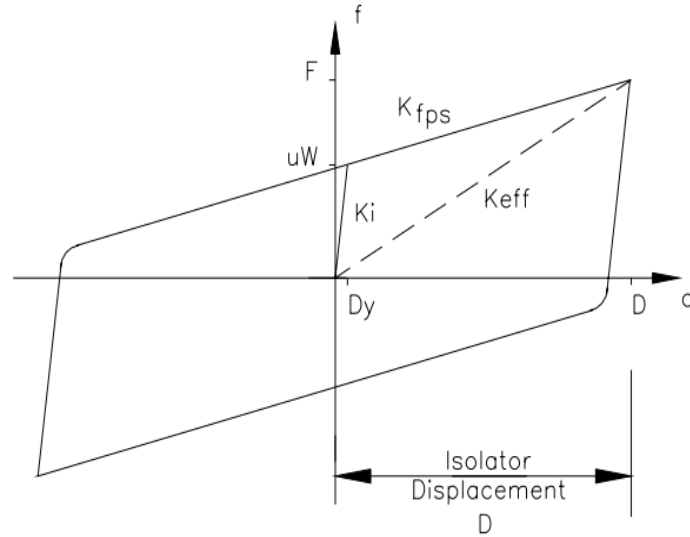


Figura 33. Ciclo de histéresis del aislador (Earthquake Protection Systems, 2005).

$u$ = Fricción dinámica

$W$  = Carga vertical en el aislador

$R$ = Radio de curvatura

$D$ = desplazamiento de diseño

$K_i$ = Rigidez inicial

$K_{fps}$ = Rigidez del aislador =  $W / R$

$$\frac{1}{k_p} = \frac{1}{k_i} + \frac{1}{k_{fps}} \quad (\text{Ecuación 5})$$

Si  $k_i \gg k_{fps}$   $k_p = k_{fps}$

$$F = \text{fuerza en el aislador} = uW + \left[ \frac{W}{R} \right] D$$

$$T = \text{periodo aislador} = 2\pi \sqrt{\frac{R}{g}} \quad (\text{Ecuación 6})$$

$$K_{eff} = \text{rigidez efectiva} = \frac{F}{D} \quad (\text{Ecuación 7})$$

$$T_{eff} = \text{periodo efectivo} = 2\pi \sqrt{\frac{W}{k_{eff} * g}} \quad (\text{Ecuación 8})$$

$$B = \text{amortiguamiento efectivo} = \frac{2}{\pi} \left[ \frac{u}{u + D/R} \right] \quad (\text{Ecuación 9})$$

$$D_y = \frac{uW}{k_i} \text{ si } D_y > 0.10 \text{ pulg entonces } D_y = 0.10 \text{ pulg} \quad (\text{Ecuación 10})$$

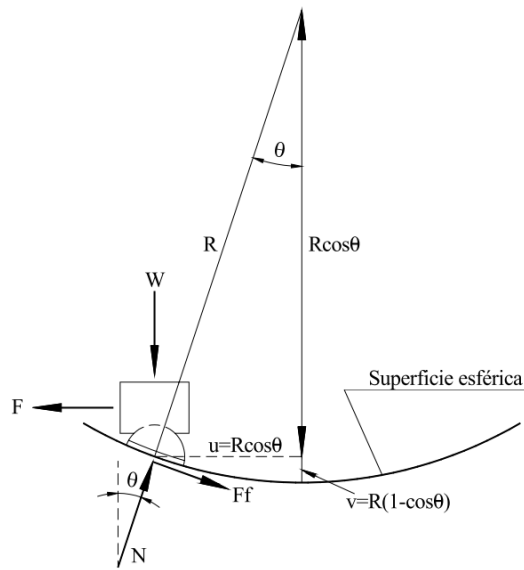


Figura 34. Diagrama de cuerpo libre FPS (Moreno et al., 2015).

De la Figura 34, se deduce la Ecuación 11, de fuerza lateral, necesaria para producir un desplazamiento  $u$  (Moreno et al., 2015).

$$F = \frac{W^*}{R} u + \mu W^* Z \quad (\text{Ecuación 11})$$

$W^*$ =carga axial (carga gravitacional, efecto movimiento vertical del suelo y momento de volcamiento).

$\mu$ =coeficiente de fricción, dado por la Ecuación 12.

$Z$ =variable en el rango (-1,1) que depende de la dirección del vector de velocidad instantánea.

$$\mu = f_{max} - (f_{max} - f_{min})\exp(-a||\hat{u}) \quad (\text{Ecuación 12})$$

$f_{max}$ =coeficiente de fricción a grandes velocidades

$f_{min}$ =coeficiente de fricción a velocidad cero de deslizamiento

$a$ =parámetro de ajuste de la curva de coeficiente de fricción vs velocidad de deslizamiento

$\hat{u}$ =velocidad instantánea

Los radios estándar ( $R$ ) disponibles del aislador tipo péndulo de fricción son: 39,61,88,120,156 y 244 pulgadas y el rango estándar del valor  $\mu$  de fricción dinámica varía entre 3% y 12% (Earthquake Protection Systems, 2005).

**6.2.2. Procedimiento de diseño.** A continuación se presenta un procedimiento de diseño para FPS, tomado de (Aguiar et al., 2008), derivado de la teoría presentada anteriormente.

1. Desplazamiento de diseño  $\Delta_{eq}$  (D)
2. Desplazamientos laterales causados por cargas de servicio  $\Delta_s$
3. Resistencia lateral requerida para el sismo de diseño  $V_{eq}$
4. Mínima resistencia lateral requerida por cargas de servicio  $V_s$
5. Peso soportado por el dispositivo,  $W$
6. Amortiguamiento equivalente,  $\xi_A$  usado para el cálculo de  $V_{eq}$



**Paso 1:** Determinación del radio de curvatura  $R$  y coeficiente de fricción  $\mu$ , expresadas en las Ecuaciones 13 y 14, respectivamente.

$$\mu = \frac{V_{eq}}{W} - \frac{\Delta_{eq}}{R} \quad (\text{Ecuación 13})$$

$$R = \frac{\Delta_{eq} \xi_A}{\frac{2}{\pi} \mu^2 - \xi_A \mu} \quad (\text{Ecuación 14})$$

Estos valores se obtienen iterando en las Ecuaciones 15 y 16.

$$k_d \geq \frac{W}{40 \Delta_{eq}} \quad (\text{Ecuación 15})$$

$$k_d \geq \frac{4\pi^2 W}{36g} \quad (\text{Ecuación 16})$$

Con estas ecuaciones se soluciona el sistema de ecuaciones formado por las Ecuaciones 17 y 18.

$$F = V_{eq} = uW + \left[ \frac{W}{R} \right] D \quad (\text{Ecuación 17})$$

$$k_d \geq \frac{W}{20 \Delta_{eq}} \quad (\text{Ecuación 18})$$

Para empezar, el valor de  $R$  se puede tomar igual a 40 veces el desplazamiento de diseño, si es que el FPS se instalara en un puente o igual a 20 veces el desplazamiento de diseño, si es que se instala en un edificio (Aguiar et al., 2008). En cada caso, utilizar valores mayores de  $R$  causa que el dispositivo no cumpla con los requisitos de fuerza de restauración mínimos, con el valor estimado de  $R$  se calcula  $\mu$ , para luego obtener un valor refinado de  $R$ . Con el nuevo valor de  $R$  se calcula  $\mu$  y se repite el proceso hasta que converja.

El resultado de este proceso son los valores de  $R$  y  $\mu$  necesarios para que el FPS desarrolle la resistencia requerida y el amortiguamiento meta considerado en el cálculo de las fuerzas de diseño.

**Paso 2:** Determinación del diámetro del dispositivo, como lo expresa la Ecuación 19. El FPS deberá tener un tamaño suficiente para acomodar los desplazamientos laterales por cargas de servicio más los desplazamientos generados por el MSC.

$$D_{fps} = 2(\Delta_{MSC} + \Delta_s) \quad (\text{Ecuación 19})$$

**Paso 3:** Calcular factores de ajuste y propiedades máximas y mínimas para el dispositivo. En los pasos anteriores se han encontrado todos los factores que definen la respuesta lateral del dispositivo. Además, se ha determinado el diámetro mínimo para el FPS. El siguiente paso es obtener del proveedor, las propiedades de un dispositivo real, construible, cuyas propiedades se acerquen lo más posible a las propiedades obtenidas en el diseño.

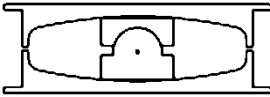
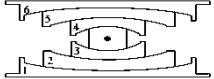
Una vez que se conocen las propiedades reales del dispositivo que se instalara en el sistema de aislamiento se procede con el diseño de la superestructura.

### 6.3. Clasificación de aisladores tipo péndulo de fricción

Existen en la actualidad 4 tipos de aisladores tipo péndulo de fricción los cuales son el péndulo de fricción simple, el péndulo de fricción doble, el péndulo de fricción triple y el péndulo de fricción quíntuple, en la Tabla 6 se presenta un resumen de las principales ventajas y características de cada uno.

Tabla 6

*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 triple.                                                                                                                            | Rendimiento de 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. |
| 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 creíble.           | 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.                               |
| 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 temperatura bajas, la rigidez y amortiguamiento de diseño se mantiene constante. |                                                                                                                                                                                |                                                                                                                                                                |                                                                                                                                                |
| Numero de péndulos efectivos  | 1                                                                                                                                                                                                                                                        | 2                                                                                                                                                                              | 3                                                                                                                                                              | 5                                                                                                                                              |
| Numero de fases de movimiento | 1                                                                                                                                                                                                                                                        | 3                                                                                                                                                                              | 5                                                                                                                                                              | 9                                                                                                                                              |

Nota: tomado de (Toloza, 2019).

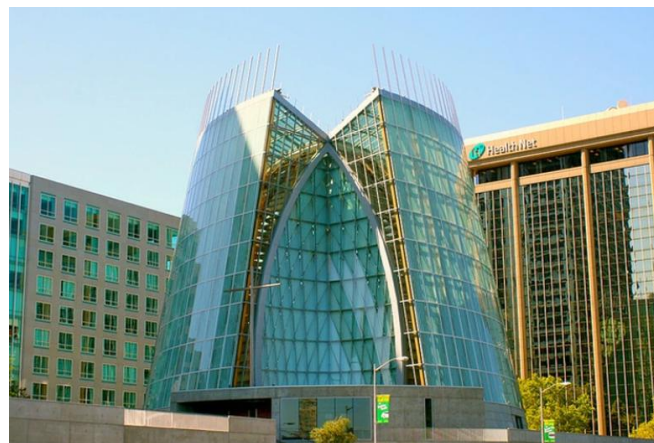
#### 6.4. Casos de éxito

En muchos países se han implementado el sistema de protección con aisladores tipo péndulo de fricción, entre los que cabe destacar la galería de arte de Christchurch mostrada en la Figura 35.



*Figura 35.* Galería de arte de Christchurch (Earthquake Protection Systems, 2019).

Durante el devastador sismo de Christchurch en febrero de 2011, la icónica galería de arte sufrió daños y asentamientos en el suelo. Se agregaron aisladores de triple péndulo a nivel del sótano como parte del plan de reparación y fortalecimiento del edificio. Los aisladores aumentan la resistencia sísmica del edificio y protegen las preciosas colecciones de arte (Earthquake Protection Systems, 2019).



*Figura 36.* Catedral La Luz de Cristo (Earthquake Protection Systems, 2019).

El sismo de Loma Prieta de octubre de 1989 destruyó al predecesor de la Catedral la luz de Cristo, mostrada en la Figura 36 y completada en 2008. Este diseño innovador logró una resistencia

sísmica mejor a la mínima del código al utilizar aisladores de triple péndulo debajo de la base de concreto (Earthquake Protection Systems, 2019).

En Colombia no se cuenta con edificaciones aisladas con sistema de péndulo de fricción, pero si se ha utilizado en la construcción de puentes como lo son el de La Estampilla en Manizales mostrado en las Figuras 37 y 38 y el viaducto Gualanday II en Tolima mostrado en la Figura 39.



*Figura 37.* Puente La Estampilla (Rendón, 2009).



*Figura 38.* Aisladores usados en el puente La Estampilla (Rendón, 2009).





Figura 39. Viaducto Gualanday II (Sociedad Colombiana de Ingenieros, 2019).

## 7. Caso colombiano

### 7.1. Protección sísmica a edificaciones en Colombia

Como puede observarse en la Tabla 7, la diferencia entre Colombia y otros países con alta amenaza sísmica como Japón es muy notable, esto podría deberse entre otros, a aspectos económicos, normativos, y, en menor medida, a condiciones técnicas, culturales o coyunturales.

Tabla 7

*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 (Piscal & López, 2016).

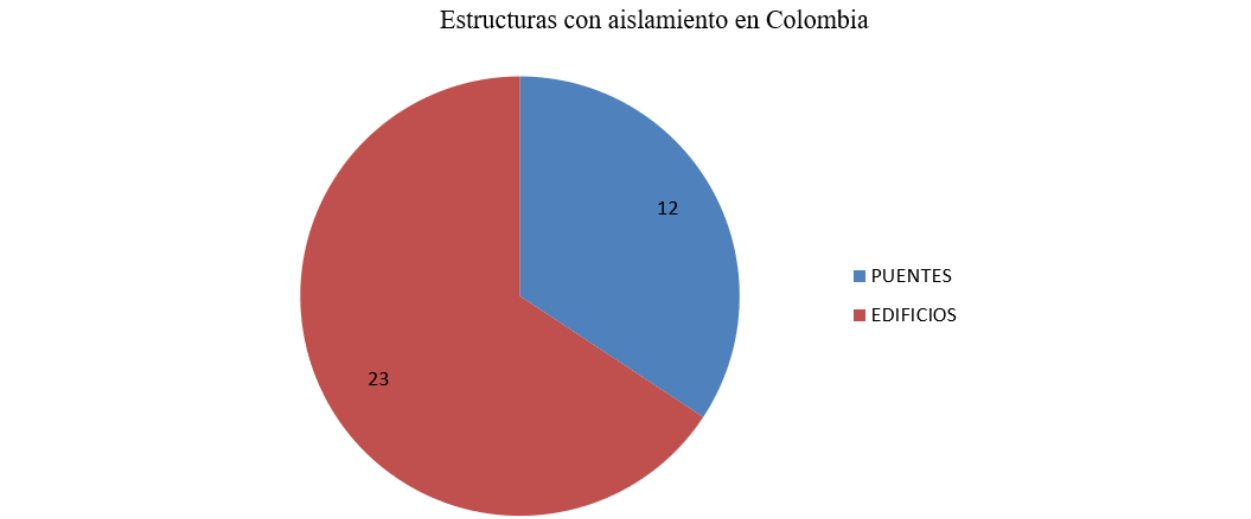


Figura 40. Levantamiento de edificios y puentes con aisladores en Colombia, realizado por el comité AIS-700 (Oviedo, 2018).

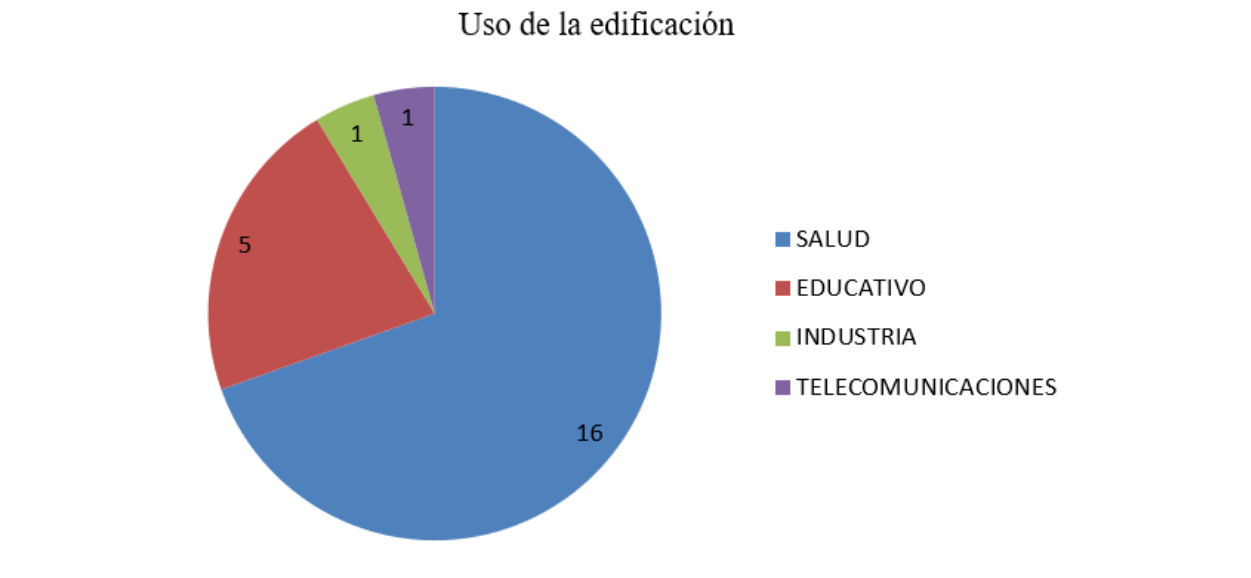


Figura 41. Uso de la edificación con aislamiento (Oviedo, 2018).



Como puede observarse según lo consignado en la Figura 40 y en la Figura 41, Colombia cuenta con 23 edificaciones con aislamiento de base, tres más que el reporte que existía del 2015 esto quiere decir que hay un interés por implementar ese tipo de sistema de control en el país.

## 7.2. Casos de aplicación

En la Figura 42, se presenta la clínica Comfandi, el cual fue el primer edificio con aislamiento sísmico en Colombia, se terminó en 2011 y está ubicado en Cali, una ciudad con un alto riesgo sísmico. Tiene una superficie de 70.000 m<sup>2</sup>, los dispositivos utilizados fueron 154 LRB con 750 mm de diámetro, 58 LRB con 58 mm de diámetro y 220 deslizadores (Piscal, 2018).



*Figura 42.* Clínica Comfandi, primer edificio aislado en Colombia (Oviedo, 2015).

Hospital Imbanaco, mostrado en la Figura 43, también ubicado en Cali, fue terminado en 2012. Tiene un área de 72,000 m<sup>2</sup>, 7 pisos y 3 sótanos (30 m de profundidad). Fue construido con LRBs de 1155 mm (17), 1054.1 mm (13), 952.5 (67) mm de diámetro y 23 deslizadores (Piscal, 2018).



*Figura 43.* Hospital Imbanaco (Toloza, 2019).

Edificio Fundadores, este edificio académico, terminado en 2014, pertenece a la Universidad Autónoma de Manizales, mostrada en la Figura 44. Tiene 6 pisos y fue construido con 29 aisladores y 26 controles deslizantes.



*Figura 44.* Edificio fundadores Universidad Autónoma de Manizales (Toloza, 2019).

---

## **8. Análisis crítico de la protección sísmica mediante aislador péndulo de fricción**

Colombia es un país donde la mayor parte de su población se encuentra ubicada en zonas de amenaza sísmica intermedia o alta, sin embargo, el uso de los sistemas de control sísmico no se ha visto implementado en gran magnitud dado que solo se evidenciaron 23 edificios con aislamiento en su base, debido al poco conocimiento y supuesto aumento del costo de este tipo de construcciones en comparación con los de base fija.

En Colombia no se tiene normativa propia sobre el aislamiento de edificaciones y como se dijo anteriormente, el uso en el país de una normativa extranjera sin un análisis previo de su aplicabilidad al contexto local, puede implicar serias inconsistencias técnicas y sobrecostos que frenen la expansión del aislamiento sísmico, ya que no se tiene en cuenta los aspectos técnicos ni la sismicidad del país.

Los aisladores tipo péndulo de fricción presentan muchas cualidades para su uso en Colombia como lo son: su capacidad de recentrado permitiendo a la estructura retornar a su posición inicial tras desplazamientos, aumento significativo de la seguridad sísmica de la estructura y de sus usuarios, puede usarse tanto a estructuras nuevas como en estructuras existentes, larga vida útil de los dispositivos, baja probabilidad de reemplazo postsismo de los aisladores.

Aunque los aisladores tipo péndulo de fricción pueden usarse en estructuras nuevas como en existentes, su aplicación en la rehabilitación o reforzamiento de estructuras existentes tiene un costo elevado en comparación a los disipadores de energía.

Los aisladores tipo péndulo de fricción tienen simplicidad en la implementación en sistemas de pórticos, pero ocurre lo contrario en los sistemas de muros de carga.

---

---

La implementación de los aisladores tipo péndulo de fricción en edificios puede implicar un costo inicial alto en comparación a un edificio de base fija, el beneficio y la economía se refleja en el momento de ocurrencia de un sismo, debido a que, el edificio diseñado con los aisladores no sufrirá los daños que sufre una estructura con base fija, en donde los costos de la rehabilitación son altos o en algunos casos deberán demoler la edificación.

El sistema de control mediante aisladores tipo péndulo de fricción incrementa el nivel de protección de la estructura, resulta adecuado para su uso en estructuras que deben mantenerse operativas durante un sismo, tales como hospitales, estaciones de bomberos, estaciones de policías, centros de atención de emergencias, centrales eléctricas, etc.

Un problema que se puede presentar en los edificios con los aisladores tipo péndulo de fricción, es al momento de presentarse desplazamientos verticales diferentes en los distintos aisladores, esto ocasionaría estados de esfuerzos que deben ser verificados sobre la estructura.

---

## 9. Conclusiones

Al describir del comportamiento de los aisladores sísmicos de base en las edificaciones, se tiene que este tipo de protección sísmica, reduce las fuerzas que el sismo induce a la estructura, al incrementar el periodo fundamental de la misma, minimizando así, los daños que se presenten ante un evento sísmico de gran magnitud.

Los aisladores se incorporan al sistema estructural y cambian sus propiedades dinámicas. Por ser muy flexibles, contribuyen a incrementar el periodo fundamental de vibración del sistema estructural. En el espectro de frecuencias del sismo, a estos altos períodos de vibración corresponden valores bajos de aceleraciones, por lo que las fuerzas inducidas por el sismo sobre la estructura disminuyen significativamente.

Entre los aisladores sísmicos de base, el péndulo de fricción fue el primer aislador en el que la fuerza de restauración se proporciona a través de la gravedad, además de permitir a la estructura desplazamientos más grandes, reduce su respuesta torsional, así como también le proporciona gran capacidad de resistir carga vertical y cortante.

Los aisladores tipo péndulo de fricción se clasifican en cuatro tipos: péndulo de fricción simple, doble, triple y quintuple, para seleccionar el tipo adecuado de aislador a utilizar en el diseño de una edificación, se debe decidir en función de las características de cada tipo de aislador, así como la relación costo – beneficio, para poder optimizar las ventajas del tipo de aislador elegido.

Las estructuras sin aisladores sísmicos están diseñadas, para presentar una respuesta ante sismos severos caracterizada por mecanismos de disipación de energía producidos por desplazamientos importantes entre los pisos, los cuales llevan a incursiones en el rango inelástico de los elementos

---

---

estructurales como vigas, columnas y muros generando daño en ellos, como también los desplazamientos entre pisos producen daño en los elementos no estructurales.

Los grandes desplazamientos entre la subestructura y la super estructura introducen requerimientos especiales de flexibilidad de las juntas de las tuberías de los sistemas de servicio para la edificación, como son agua potable, aguas servidas, gas, electricidad, telecomunicaciones, etc. Además, también debe considerarse la presencia de escaleras y rampas de acceso a la edificación, los ascensores y escaleras mecánicas, entre otros dispositivos, deben ser concebidas de manera tal que se adapten a los movimientos en la zona de interfaz.

En Colombia, la NSR – 10 en su Capítulo A.3.8, contempla que, para las estructuras aisladas sísmicamente en su base, se deben cumplir con todos los requisitos, las normativas estipuladas por la FEMA 450 y el ASCE 7-05. Al no tener Colombia una normativa propia, es importante crear e implementar una norma de aislamiento sísmico adaptada a las condiciones sísmicas del país, así como sus condiciones técnicas y económicas, ya que, al no contar con dicha normativa propia, se incurre a posibles sobrecostos o parámetros de diseño inferiores a los requeridos.

---

---

### Referencias Bibliográficas

- Aguiar, R., Almazán, J., Dechent, P., & Suárez, V. (2008). *Aisladores de Base Elastomericos y FPS* (1a Edición; C. de I. Científicas., Ed.).
- Almazán, J. L. (2010). Comportamiento de estructuras antisísmicas durante el terremoto del maule y su posible efecto en las normas de diseño sísmico en Chile. *Revista Sul-Americana de Engenharia Estrutural*, 3(2), 4–28.
- BBC. (2017). Al menos 305 muertos por el potente terremoto de magnitud 7,1 que sacudió el centro de México el día del aniversario del gran sismo de 1985. Retrieved from [www.bbc.com/mundo/noticias-america-latina-41324383](http://www.bbc.com/mundo/noticias-america-latina-41324383)
- Betancur, N., Galvis, F., & Rosillo, L. (2014). *Experiencias sobre aislamiento sísmico en Colombia*. (June). Retrieved from <https://www.researchgate.net/publication/317600759%0AExperiencias>
- Calvi, P. M., & Calvi, G. M. (2018). Historical development of friction-based seismic isolation systems. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 106(October 2017), 14–30. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2017.12.003>
- Castaldo, P., Palazzo, B., Ferrentino, T., & Petrone, G. (2017). Influence of the strength reduction factor on the seismic reliability of structures with FPS considering intermediate PGA/PGV ratios. *Composites Part B: Engineering*, 115, 308–315. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.09.072>
- Chouw, N., & Hao, H. (2012). Pounding Damage to Buildings and Bridges in the 22 February 2011 Christchurch Earthquake. *International Journal of Protective Structures*, 3(2), 123–139.
-

---

<https://doi.org/10.1260/2041-4196.3.2.123>

Clifton, C., Bruneau, M., Macrae, G., Leon, R., & Fussell, A. (2011). STEEL STRUCTURES DAMAGE FROM THE CHRISTCHURCH EARTHQUAKE SERIES OF 2010 and 2011. *New Zealand Society For Earthquake Engineering*, 44(4), 297–318.

Cole, G. L., Dhakal, R. P., & Turner, F. M. (2012). Building pounding damage observed in the 2011 Christchurch earthquake. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, (August 2011), 893–913. <https://doi.org/10.1002/eqe>

Condo, C., & Williams, F. (2013). *GUÍA DE DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UN AISLADOR ELASTOMÉRICO PARA UNA EDIFICACIÓN DE CUATRO PISOS*. Universidad de las Fuerzas Armadas.

Ealangi, I. (2010). Earthquake Protection of Buildings By Seismic Isolation . Devices and Concepts Isolation . Devices and Concepts. *Young Researchers Conference*, (July).

Earthquake Protection Systems. (2005). TECHNICAL CHARACTERISTICS OF FRICTION PENDULUM BEARINGS. *Measurement Techniques*, 9(12), 1602. <https://doi.org/10.1007/BF00990201>

Earthquake Protection Systems. (2019). Buildings. Retrieved from <https://www.earthquakeprotection.com/buildings>

Franke, K. W., Candia, G., Mayoral, J. M., Wood, C. M., Montgomery, J., Hutchinson, T., & Morales, A. C. (2019). Observed building damage patterns and foundation performance in Mexico City following the 2017 M7 . 1 Puebla-Mexico City earthquake. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 125(May), 18. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2019.105708>

---



- 
- Galindo, C., Nieto, J., Delgado, J., Moor, G., Rodriguez, J., Bailles, B., ... Duran, L. (2017). RECENT APPLICATIONS OF SEISMIC ISOLATION AND ENERGY DISSIPATION SOLUTIONS IN LATIN AMERICA. *6th World Conference on Earthquake Engineering, 16WCEE 2017*, (January).
- Genatios, C., & Lafuente, M. (2016). *Introducción Al Uso De Aisladores Y Disipadores En Estructuras* (C.-B. de D. de A. Latina & Esta, Eds.). Retrieved from [scioteca.caf.com](http://scioteca.caf.com)
- Gómez, D., Marulanda, J., & Thomson, P. (2008). Control systems for dynamic loading protection of civil structures. *DYNA (Colombia)*, 75(155), 77–89.
- Kam, W. Y., Pampanin, S., & Elwood, K. (2011). Seismic performance of reinforced concrete buildings in the 22 February Christchurch (Lyttelton) earthquake. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, 44(4), 239–278.
- Kelly, T. E. (2001). *Base Isolation of Structures* (H. C. G. Ltd, Ed.). <https://doi.org/10.1002/eqe.31>
- Laverde, L. (2017). *Sistemas modernos de protección sísmica en edificaciones*. Universidad Industrial de Santander.
- Makris, N. (2019). Seismic isolation: Early history. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 48(2), 269–283. <https://doi.org/10.1002/eqe.3124>
- Meza, R., & Sanchez, E. (2010). *GUIA DE DISEÑO SISMICO DE AISLADORES ELASTOMERICOS Y DE FRICCION PARA LA REPUBLICA DE NICARAGUA*. UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA.
- Moreno, D. M., Yamín, L. E., & Reyes, J. C. (2015). *Estudio Experimental de Aisladores Sísmicos Tipo Péndulo de Fricción en Modelos a Escala Reducida*. (May). Retrieved from
-

---

[https://www.researchgate.net/publication/266878277\\_Estudio\\_Experimental\\_de\\_Aisladores\\_Sismicos\\_Tipo\\_Pendulo\\_de\\_Friccion\\_en\\_Modelos\\_a\\_Escala\\_Reducida](https://www.researchgate.net/publication/266878277_Estudio_Experimental_de_Aisladores_Sismicos_Tipo_Pendulo_de_Friccion_en_Modelos_a_Escala_Reducida)

Murnal, P., & Sinha, R. (2002). Earthquake Resistant Design of Structures using the Variable Frequency Pendulum Isolator. *Journal of Structural Engineering*, 128(7), 870–880. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9445\(2002\)128:7\(870\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9445(2002)128:7(870))

Naeim, F., Lew, M., Carpenter, L., Youssef, N., Rojas, F., Saragoni, R., & Schachter, M. (2011). Performance of tall buildings in Santiago, Chile during the 27 February 2010 offshore Maule, Chile earthquake. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 24(December 2010), 421–439. <https://doi.org/10.1002/tal>

NSR. (2010). *Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente. TITULO A*, 186.

Oviedo, J. (2015). Protección Sísmica y Reforzamiento de Edificaciones a través de Sistemas no Convencionales. *3er Simposio de Ingeniería de Materiales y Estructuras*.

Oviedo, J. (2018). Aislamiento Sísmico de Edificaciones y Puentes. *Jornadas XVII Geotécnicas y XX Estructurales*.

Oviedo, J., & Duque, M. del P. (2006). SISTEMAS DE CONTROL DE RESPUESTA SÍSMICA EN EDIFICACIONES. *Revista EIA*, (11), 16. Retrieved from <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=a9h&AN=45266819&lang=es&site=ehost-live>

Oviedo, J., & Duque, M. del P. (2009a). DISIPADORES HISTERÉTICOS METÁLICOS COMO TÉCNICA DE CONTROL DE RESPUESTA SÍSMICA EN EDIFICACIONES COLOMBIANAS. *Revista EIA*, 13.

---

- 
- Oviedo, J., & Duque, M. del P. (2009b). SITUACIÓN DE LAS TÉCNICAS DE CONTROL DE RESPUESTA SÍSMICA EN COLOMBIA. *Revista EIA*, 12.
- Pinzón, N., & Martínez, E. (2014). *Estado del Arte y Modelo Didáctico Descriptivo de Amortiguadores y Aisladores Sísmicos*. NATHALY PINZÓN MAYORGA EDWIN MARTÍNEZ LÓPEZ Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Civil Directora: ING. MARISOL NEMOCÓN RUÍZ UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA.
- Piscál, C. (2018). *NEW DESIGN CONSIDERATIONS BUILDINGS IN COLOMBIA FOR SEISMIC ISOLATED*.
- Piscál, C., & 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), 22.
- Piscál, C., & López, F. (2018). Propuesta para la futura norma de aislamiento sísmico de edificaciones en Colombia. *Dyna*, 85(207), 306–315.  
<https://doi.org/10.15446/dyna.v85n207.72296>
- Rendón, J. (2009). El Aislamiento Sísmico de Estructuras. *Encuentro Internacional Del Acero En Colombia*.
- Saatcioglu, M., Palermo, D., Ghobarah, A., Mitchell, D., Simpson, R., Adebar, P., ... Hong, H. (2012). Performance of reinforced concrete buildings during the 27 February 2010 Maule (Chile) earthquake. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 40(July), 693–710.
- Sociedad Colombiana de Ingenieros. (2019). VIADUCTO DE GUALANDAY II. Retrieved from <https://sci.org.co/viaducto-de-gualanday-ii/>
-

- 
- The New York Times. (2017). El terremoto de México en imágenes. Retrieved from [www.nytimes.com/es/2017/09/19/terremoto-fotos-mexico/](http://www.nytimes.com/es/2017/09/19/terremoto-fotos-mexico/)
- Tolozá, H. (2019). *SISTEMAS DE AISLAMIENTO SÍSMICO TIPO PÉNDULO DE FRICCIÓN*.
- Valerio, J. J. (2015). *Análisis Comparativo de un Edificio fijo en la base vs un Edificio Aislado utilizando 4 tipos de Aisladores Sísmicos*. 160.
- Villavicencio, E. (2015). *ANÁLISIS SÍSMICO ESTRUCTURAL COMPARATIVO PARA EDIFICIOS CON AISLADORES DE BASE TIPO ELASTOMÉRICOS Y FRICCIONANTES, PARA LOS DIFERENTES TIPOS DE SUELOS DEL ECUADOR*.
- Wang, J., & Li, D. (2009). *Analysis on Seismic Response of Base-Isolated Structures with Friction Pendulum System under Bilateral Ground Motions*. 1–6.  
[https://doi.org/10.1061/40988\(323\)201](https://doi.org/10.1061/40988(323)201)
- Wikinews. (2011). Un terremoto de 6,3 grados afectó a Nueva Zelanda. Retrieved from [Es.wikinews.org/wiki/Un\\_terremoto\\_de\\_6,3\\_grados\\_afectó\\_a\\_Nueva\\_Zelanda](http://Es.wikinews.org/wiki/Un_terremoto_de_6,3_grados_afectó_a_Nueva_Zelanda)
- Zayas, V., Low, S., & Mahin, S. (1990). A Simple Pendulum Technique for Achieving Seismic Isolation. *Earthquake Spectra*, Vol. 6, 17.
-