

Desempeño de aisladores de base en una edificación educativa sometida a acciones sísmicas

María Camila Corredor Pérez, Andrés Fernando Ariza Beltrán

Monografía para Optar el título de Especialista en Estructuras

Director

Oscar Javier Begambre Carrillo

Ingeniero Civil, Magister en Ingeniería de Estructuras, PhD en Ingeniería de Estructuras.

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas
Escuela de Ingeniería Civil
Especialización en estructuras
Bucaramanga

2019

Agradecimientos

Agradezco a Dios por permitirme estar viva, a mis padres por todo el esfuerzo que han realizado por mí, a mi hermana por su apoyo incondicional.

MARÍA CAMILA CORREDOR PÉREZ

A Dios, a mis padres por su infinito apoyo y amor, a mis hermanos por su ejemplo y a María Angélica por ser mi complemento.

ANDRÉS FERNÁNDO ARIZA BELTRÁN

Agradecemos a Oscar Begambre por su apoyo en la dirección de nuestra monografía.

Tabla de Contenido

Introducción	15
1. Objetivos	18
1.1 Objetivo General	18
1.2 Objetivos Específicos	18
1.3 Alcance	19
2. Marco Teórico	20
2.1 Aislamiento sísmico	20
2.2 Protección sísmica en edificaciones	22
2.3 Sistemas de aislamiento sísmico	23
2.4 Efectos de los aisladores en la estructura	27
2.4.1 Periodo fundamental y factor de amortiguamiento	27
2.4.2 Espectro de respuesta del sismo	28
2.4.3 Modos de vibración	29
2.4.4 Desempeño sísmico	30
2.5 Objetivos del uso de los aisladores sísmicos	31
2.6 Métodos de análisis estructural	32
2.6.1 Método de análisis dinámico	32
2.7 Análisis cronológico lineal	33
2.7.1 Método de Newmark:	34
2.7.2 Estimación de las fracciones de amortiguamiento modal	35
2.7.3 Matriz de amortiguamiento clásico	36

2.7.4 Amortiguamiento de Rayleigh	36
2.8 Tratamiento de señales o acelerogramas	38
2.8.1 Corrección de los acelerogramas	38
2.8.2 Escalamiento de los acelerogramas:.....	39
2.9 Análisis modal espectral	40
2.9.1 Ecuaciones de movimiento	41
2.9.2 Desplazamientos y fuerzas	41
3.0 Dispositivos de aislamiento pasivo	42
3.1 Aisladores elastoméricos con núcleo de plomo de la serie LRB (Lead Rubber bearings)	43
3.1.1 Parámetros de cálculo	44
3.1.2 Propiedades de los materiales	47
3.1.3 Comportamiento bilineal estable.....	47
3.2 Aisladores elastoméricos de alta amortiguación (High Damping Rubber Bearings)	47
3.2.1 Propiedades de los materiales	48
3.2.2 Comportamiento bilineal estable.....	48
4.0 Análisis de modelos de estructuras aisladas.....	49
4.1 Consideraciones y criterios de modelamiento.....	49
4.2 Ventajas de la implementación de aisladores en estructuras	50
5. Metodología para determinar las características mecánicas de aisladores LRB y HDRB	52
5.1 Características mecánicas del Aislador de base LRB (Lead-Rubber Bearing)	52
5.2 Características mecánicas del Aislador de base HDRB (High Damping Rubber Bearings).....	53
6. Caso de estudio: Aislamiento de base en edificación educativa con grupo de uso: tres.....	56
6.1 Descripción de la edificación	56
6.2 Método de análisis.....	57

6.3 Modelado de la estructura con aisladores LRB.....	65
6.4 Modelado de la estructura con aisladores HDRB	66
6.5 Criterio de modificación del espectro de diseño	67
6.6 Resultados	67
6.7 Comparación de los resultados.....	75
7. Conclusiones	85
referencias Bibliográficas.....	87

Lista de Tablas

Tabla 1. Clasificación de los sistemas de protección sísmica.....	25
Tabla 2. Valores de amortiguamiento recomendados (Chopra, A.K. 2014),.....	35
Tabla 3 Materiales de la edificación	57
Tabla 4. Elementos estructurales de la edificación	57
Tabla 5. Características del análisis dinámico	60
Tabla 6. Familia de acelerogramas para el área metropolitana de Bucaramanga	61
Tabla 7. Peso de la estructura y máxima reacción en los apoyos	65
Tabla 8. Especificaciones aislador LBR-S500/150-110	66
Tabla 9.Especificaciones aislador LBR-S750/154-160	66
Tabla 10. Periodo de vibración para base fija y base aislada.....	68
Tabla 11. Periodo y porcentaje de participación del modo de vibración de la estructura.....	68
Tabla 12. Cortante basal de la estructura con base fija y con la base aislada	69
Tabla 13. Desplazamientos de la estructura con base fija y con la base aislada.....	72
Tabla 14. Derivas de la estructura con base fija y con la base aislada.....	74
Tabla 15. Incremento del periodo fundamental de la estructura.....	76
Tabla 16. Disminución del cortante basal	76

Lista de Figuras

Figura 1. Efecto del aislamiento de base en las deflexiones de estructuras con base fija.....	21
Figura 2. Técnica de aislamiento sísmico en la base Masahiko H. & Okamoto, Shin. (eds). September 2006	24
Figura 3. Variación en el Periodo estructura base fija o convencional versus estructura aislada en su base.	28
Figura 4. Variación de las fracciones de amortiguamiento modal con la frecuencia natural:	37
Figura 5. Aislador elastoméricos con núcleo de plomo LRB.	43
Figura 6. Bucle histerético fuerza- desplazamiento de un aislador elastomérico con núcleo de plomo.	44
Figura 7 Variación de la rigidez efectiva y del coeficiente de amortiguación viscosa equivalente típicos en función de la deformación por cortante.	45
Figura 8 Aislador elastomérico con núcleo de plomo.....	46
Figura 9. Aislador con Núcleo de Plomo LASTO®LRB	46
Figura 10. Ciclos histeréticos de los aisladores elastomérico con núcleo de plomo típico obtenidos a través de ensayos dinámicos con amplitud creciente.	47
Figura 11. Gráfico de comportamiento bilineal de HDRB	49
Figura 12. Diagrama de flujo metodología para diseño de aisladores HDRB	55
Figura 13. Estructura original	56
Figura 14 Procedimiento para corrección de acelerogramas en software SeismoSignal 2018	59
Figura 15. Procedimiento para corrección de acelerogramas en software SeismoMatch 2018	60

Figura 16. Espectro de diseño.	61
Figura 17. Verificación requisito 1 del A.2.7. del NSR-10.....	62
Figura 18. Verificación requisito 2 del A.2.7. del NSR-10.....	63
Figura 19. Espectro de diseño NSR-10 modificado.....	67
Figura 20. Cortante basal estructura base fija (kN vs s)	70
Figura 21. Cortante basal estructura aislada HDRB H =30 cm (kN vs s).....	70
Figura 22. Cortante basal estructura aislada (LBR S500/150-110) (kN vs s).....	71
Figura 23. Cortante basal estructura aislada (LBR S750/154-160) (kN vs s).....	71
Figura 24. Espectro de diseño NSR-10 modificado.....	75
Figura 25. Comparación cortante basal base fija y base asilada (LRB S500/150-110).....	76
Figura 26. Comparación cortante basal base fija y base asilada (LRB S500/150-110).....	77
Figura 27. Comparación cortante basal base fija y base asilada (LRB S750/154-160).....	77
Figura 28. Comparación cortante basal base fija y base asilada (LRB S750/154-160).....	78
Figura 29. Comparación cortante basal base fija y base asilada (HDRB H=30)	78
Figura 30. Comparación cortante basal base fija y base asilada (HDRB H =30 CM).....	78
Figura 31. Comparación desplazamientos (LRB S-500/150-110).....	79
Figura 32. Comparación desplazamientos (LRB S-500/150-110).....	79
Figura 33. Comparación desplazamientos (LRB S-750/154-160).....	80
Figura 34. Comparación desplazamientos (LRB S-750/154-160).....	80
Figura 35. Comparación desplazamientos (HDRB H=30 cm).....	81
Figura 36. Comparación desplazamientos (HDRB H=30 cm).....	81
Figura 37. Comparación desplazamientos (LRB S-500/150-110).....	82
Figura 38. Comparación desplazamientos (LRB S-500/150-110).....	82

Figura 39. Comparación desplazamientos (LRB S-750/154-160).....	83
Figura 40. Comparación desplazamientos (LRB S-750/154-160).....	83
Figura 41. Comparación desplazamientos (HDRB H=30 cm).....	84
Figura 42. Comparación desplazamientos (HDRB H=30 cm).....	84

RESUMEN

TÍTULO: DESEMPEÑO DE AISLADORES DE BASE EN UNA EDIFICACIÓN EDUCATIVA SOMETIDA A ACCIONES SISMICAS*

AUTORES: MARIA CAMILA CORREDOR PEREZ**
ANDRES FERNANDO ARIZA BELTRÁN**

PALABRAS CLAVE: AISLADORES, SISMO RESISTENTE, ESTRUCTURA EDUCATIVA, ANALISIS DINAMICO, ACELEROGRAMA, DERIVAS, DESPLAZAMIENTO, CORTANTE.

DESCRIPCIÓN:

Con el fin de reducir la vulnerabilidad de las edificaciones ante un sismo se han implementado medidas de manera exitosa como lo es el aislamiento de base, especialmente en edificaciones de servicio a la comunidad. En este estudio se presenta la comparación entre el comportamiento sísmico de una edificación educativa antes y después de ser aislados sísmicamente. Se realiza un análisis modal espectral y un análisis cronológico, empleando los acelerogramas disponibles en el estudio de la microzonificación sísmica del área metropolitana de Bucaramanga. Se usó el software SAP2000 V.20 (2019) con la licencia otorgada por el grupo de investigación INME de la Universidad Industrial de Santander-Colombia, para el modelamiento de la edificación, considerando un comportamiento lineal, de dos tipos de aisladores, en primer lugar un aislador elastomérico con capas de acero con neopreno y en segundo lugar un aislador elastomérico con núcleo de plomo. Obteniendo finalmente una reducción considerable en la respuesta sísmica de cortante y de derivas. Con respecto a la comparación de los aisladores empleados, se obtuvo mejores resultados en términos de reducción de derivas y cortantes con el empleo del aislador elastomérico con capas de acero con neopreno, considerando que la metodología de selección de los aisladores elastoméricos con núcleo de plomo, se basó en los catálogos comerciales y las características requeridas no fueron satisfechas con exactitud.

*Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director Oscar Javier Begambre Carillo

ABSTRACT

TITLE: DESEMPEÑO DE AISLADORES DE BASE EN UNA EDIFICACIÓN EDUCATIVA SOMETIDA A ACCIONES SISMICAS*

AUTHORS: MARIA CAMILA CORREDOR PEREZ**
ANDRES FERNANDO ARIZA BELTRÁN**

KEYWORDS: ISOLATOR, RESISTANT SISM, EDUCATIONAL STRUCTURE, DYNAMIC ANALYSIS, ACCELEROGRAM, DRIFTS, DISPLACEMENT, SHEAR

DESCRIPCIÓN:

In order to reduce the vulnerability of buildings to an earthquake, successful measures have been implemented, such as grassroots isolation, especially in community service buildings. This study presents a comparison between the seismic behavior of an educational building before and after it is seismically isolated. Spectral modal analysis and chronological analysis are performed, using the accelerograms available in the study of seismic microzoning of the metropolitan area of Bucaramanga. The software SAP2000 V.20 (2019) was used with the license granted by the INME research group of the Industrial University of Santander-Colombia, for the modeling of the building, considering a linear behavior, of two types of insulators, first an elastomeric insulator with layers of neoprene steel and second a nucleus insulator with elastomeric. Finally getting a considerable reduction in the seismic response of shear and drift. To the comparison of the insulators used, better results were obtained in terms of reduction of drifts and shear with the use of the elastomeric insulator with steel layers with neoprene, considering that the selection methodology of the elastomeric insulators with lead core, It was based on commercial catalogs and the required features were not met exactly.

* Barchelor Thesis

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director Oscar Javier Begambre Carillo

Introducción

Más del 87% de la población colombiana está expuesta a una amenaza sísmica entre intermedia y alta. La sismicidad en Colombia está relacionada con la actividad en la zona de subducción del pacífico colombiano y en las fallas geológicas. Al estar ubicada donde convergen las placas tectónicas de Nazca y del Caribe contra la placa Suramericana, Colombia se localiza dentro de una de las zonas sísmicas más activas de la Tierra NSR-10 (AIS, Marzo de 2010). Aun cuando la amenaza sísmica no constituye un riesgo de no ser acompañada por edificaciones vulnerables y la vulnerabilidad sísmica está representada por la capacidad de una edificación para resistir daño o afectación frente a la amenaza sísmica, es sabido que durante y después un sismo el daño parcial o colapso de las construcciones es la mayor causa de víctimas, disturbios sociales y pérdidas económicas NSR-10 (AIS, Marzo de 2010).

Con el fin de reducir la vulnerabilidad de las edificaciones ante un sismo es indispensable diseñar las edificaciones para que resistan eventos sísmicos grandes sin colapsar y eventos sísmicos moderados sin daño en la estructura y daños mínimos o nulos en los elementos no estructurales. Las técnicas convencionales estipuladas por la reglamentación actual NSR-10 (AIS, Marzo de 2010), para mitigar y controlar la respuesta de una edificación ante un evento sísmico, se basan en la combinación de resistencia, rigidez y capacidad de disipación de energía en el rango inelástico de la estructura, tomando como condición su ductilidad. En estructuras de concreto reforzado y otros materiales convencionales, estas técnicas convencionales exigen una cuidadosa disposición de la configuración estructural, del refuerzo, de los tipos de conexiones y otros, que aumentan su costo frente a una estructura no sismo resistente, presentando, además, el

inconveniente de que la estructura, por su mismo trabajo inelástico, sufre daños permanentes, muchas veces sin posibilidad de reparación.

En Colombia varias estructuras tienen frecuencias de vibración dentro de la banda de frecuencias donde la energía del sismo es la máxima. En estos casos la estructura amplifica las vibraciones y produce aceleraciones que incrementan desde la base hasta la parte superior de la misma, generándose indeseados niveles de aceleración en la estructura, que pueden causar daños en el contenido, daños severos en los elementos estructurales o su colapso (Matsagar, V. A. & Jangid R. S, 2008)

Como metodologías para mitigar el efecto que los sismos generan en las estructuras, en diversos países, las técnicas convencionales de disipación de energía se han complementado con sistemas adicionales a los componentes estructurales de la edificación, modificando las características dinámicas de la estructura, controlando o disipando parte de la energía impuesta por el sismo. El uso de estas técnicas de control de respuesta sísmica tiene como objetivo reducir la demanda sísmica de la propia estructura controlando su deformación y, por lo tanto, su daño (Oviedo & Duque, 2006)

Una técnica de control de respuesta sísmica es el aislamiento de base. Debido a las grandes ventajas que presenta esta metodología frente a la convencional, a la necesidad inminente de aplicar estas técnicas en el medio colombiano y a que a nivel mundial se ha desarrollado, evidenciando buenos resultados tales como una reducción en el nivel de daño de los elementos estructurales y no estructurales, se considera de gran importancia realizar una revisión de los conceptos básicos de funcionamiento de la técnica, de los dispositivos disponibles comercialmente y de los métodos de análisis y de diseño.

En este trabajo, se presentan los resultados de un análisis comparativo entre una edificación de uso educativo con base fija y con base aislada, mediante análisis dinámicos lineales, y el uso de dos tipos de aisladores comerciales, para luego determinar el porcentaje de efectividad que tuvieron los aisladores sobre el comportamiento de la edificación y se concluirá qué tipo de aislador tuvo mejor respuesta así como el método de análisis estructural empleado en los modelos con base aislada y base fija. La edificación se encuentra ubicada en Bucaramanga, Santander, una de las zonas con la mayor concentración de eventos sísmicos en Colombia y conocida como el “Nido sísmico de Bucaramanga”, con epicentros ubicados en la zona de la Mesa de Los Santos en el departamento de Santander. Al igual en el departamento de Santander se presenta la Falla de Bucaramanga que es el segmento sur del sistema de fallas de Santa Marta-Bucaramanga, que se extiende desde el Mar Caribe, en el Norte, hasta el municipio de Ricaurte, en el Sur, cubriendo una distancia de 550 km (Paris, Machette, Dart y Haller, 2000). Diederix, Hernández, Torres, Osorio y Botero, (2009) realizan el primer estudio paleosismológico emprendido sobre la falla de Bucaramanga y el primero también en el nororiente colombiano, y concluye con respecto a los pronósticos de la amenaza sísmica de la región que: “los estudios anteriores, (...), también corroboran la conclusión de que la Falla de Bucaramanga ha tenido alta actividad durante el Cuaternario tardío; es decir, que esta falla debe ser considerada como activa, y el registro de ocho paleosismos en un período de 8300 años del Holoceno puede ser tomado como evidencia contundente de eso.”(p.23).

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Comparar la respuesta sísmica de una edificación educativa, perteneciente al grupo de uso tres implementando aisladores elastoméricos en la base de tipo Lead Rubber bearings (LRB) y High Damping Rubber Bearings (HDRB), y sin implementarlos, en una zona de amenaza sísmica alta, mediante dos tipos de análisis cronológico lineal y análisis modal espectral.

1.2 Objetivos Específicos

- Emplear la metodología implementada en la normativa ASCE/SEI 7-16 para la obtención de los parámetros necesarios en el análisis del modelo de la edificación, de los aisladores elastoméricos de base tipo LRB y HDRB a usar en el software SAP2000 V.20 (2019).
- Determinar las respuestas de desplazamientos, derivas, cortante basal y valor del periodo fundamental de una edificación de uso educativo mediante análisis modal espectral, y análisis cronológico lineal, con base aislada y base fija.
- Comparar la eficiencia de los aisladores de base tipo LRB versus tipo HDRB, a partir de los resultados desplazamiento horizontal, derivas y cortantes de la estructura aislada.
- Comparar los resultados del análisis cronológico lineal y el análisis modal espectral a emplear para la obtención de los parámetro de derivas y cortante

1.3 Alcance

En el presente estudio se realizará el modelamiento de una estructura educativa con el uso del Software SAP2000 V.20 con base fija a partir del cual se realizará la selección de un aislador de LRB y el diseño de un aislador HDRB según el ASCE 70-16, los cuales serán modelados considerando su comportamiento lineal. A partir de este modelo se revisará la incidencia de los aisladores sísmicos en termino de desplazamientos, derivas y cortante.

2. Marco teórico

2.1 Aislamiento sísmico

Con el fin de comprender el funcionamiento de los sistemas de aislamiento sísmico, es importante tener en cuenta cómo se producen los terremotos. Los terremotos son generados por movimientos no libres, de reajuste de las placas de la corteza terrestre, existiendo restricciones en las zonas de contacto entre las placas, que producen deformaciones y tensiones que se acumulan llegando a un nivel de tal intensidad, que se genera una ruptura brusca en la falla (Lafuente, Grases y Genatios, 2014). Al ocurrir un terremoto se libera energía de la deformación acumulada, con lo cual se producen desplazamientos en las zonas de contacto y un reajuste de las placas. Este proceso se conoce como la *teoría del rebote elástico* (Reid, 1910). Un terremoto es un movimiento vibratorio complejo del terreno, que incluye varios tipos de ondas, con distintas amplitudes frecuencias y tiempos de ocurrencia. Estas ondas de movimiento llegan a la base de la estructura y producen un movimiento en su cimentación, transmitiéndose al resto de la misma y por lo tanto la hace oscilar. Los desplazamientos de los diferentes puntos de la estructura generarán fuerzas en los elementos que la componen (viga, columnas, muros), siendo posible que estas fuerzas puedan superar la resistencia de algunos elementos y eso puede producir el colapso de algunos estos elementos y desplazamientos importantes en la estructura (Genatios, Lafuente, 2016).

Una forma de reducir los niveles de energía que introduce el sismo a la estructura es a través del uso de sistemas de aislamiento. En Colombia no existe una normativa propia para el diseño de edificaciones con aislamiento sísmico de base. El Reglamento Colombiano de Construcciones

Sismo Resistentes NSR-10 (AIS, Marzo de 2010), recomienda seguir las indicaciones de documentos americanos como ASCE/SEI 7-05, o FEMA 450. Según los lineamientos de alguna de estas normas han sido diseñados y construidos edificios con asilamiento de base en Colombia, (aproximadamente 30) (Mason, W., 2015).

El aislamiento sísmico está orientado a reducir las fuerzas inducidas por el sismo a una estructura, mediante la implementación de aisladores sísmicos. La función principal del aislamiento sísmico es disminuir la acción sísmica mediante la reducción de las fuerzas horizontales que actúan sobre la estructura durante un terremoto. Esto se consigue mediante:

- Aumento de la flexibilidad a través de la implementación de aisladores sísmicos entre los cimentación y la superestructura, o entre las columnas y las vigas de una estructura, buscando aumentar en gran medida el período, lo que reduce la aceleración espectral, y luego las fuerzas sísmicas sobre la estructura. Ver figura 1.

Disipación de energía en forma de calor (histéresis) a través del aislador que permite una reducción adicional de las fuerzas sísmicas.

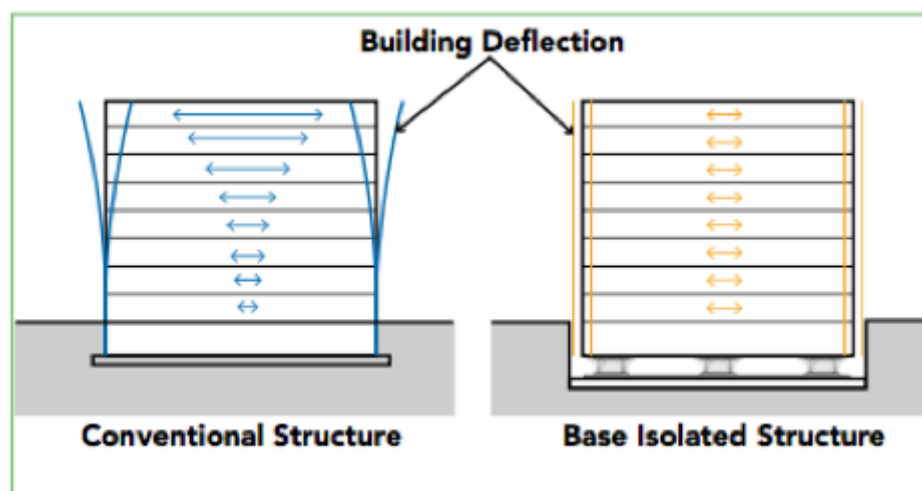


Figura 1. Efecto del aislamiento de base en las deflexiones de estructuras con base fija.

Tomado DOSHIN RUBBER ENGINEERING (2018) . BASE ISOLATION HIGH DAMPING RUBBER BEARING, Malaysia. Recuperado de: <https://doshinrubber.com/high-damping-rubber-bearing>

2.2 Protección sísmica en edificaciones

Aproximadamente en el año 1967 se inició el interés en el campo de la investigación del aislamiento sísmico, con el fin de mitigar el riesgo y los efectos de los sismos en las edificaciones, construcciones vulnerables y puentes. El Laboratorio de Ingeniería del Departamento de Investigación Científica e Industrial (PEL. DSIR) en Nueva Zelanda ha sido pionero en el aislamiento sísmico, con investigaciones que comenzaron en ese año (Skinner, Robinson, y Mcverry, 1993).

En la actualidad el aislamiento de base es un sistema de protección sísmica que consiste esencialmente en la instalación de mecanismos que, desacoplan parcialmente en dirección horizontal la estructura del daño potencial, debido a un terremoto inducido por el movimiento del suelo a la cimentación de la estructura. Este desacople se logra incrementando la flexibilidad horizontal de la estructura o del sistema junto con un apropiado amortiguamiento.

Para tal fin se emplean aisladores, dispositivos de apoyo que poseen gran flexibilidad horizontal y pueden ser hechos con materiales elastoméricos, o basados en deslizamiento de elementos metálicos, o en combinación de ambos. Durante el movimiento sísmico, al emplear estos dispositivos se pretende reducir los desplazamientos y fuerzas que el suelo transmite a la estructura, para reducir los daños tanto en elementos estructurales como no estructurales, proporcionando así un mejor nivel de desempeño con respecto a edificaciones con base fija.

La técnica de aislamiento de base fue implementada por primera vez en el año 440 A.C. en la obra Partenón, en el cual las columnas podían desplazarse verticalmente para permitir rotación en su base (Aguilar, Almazán., Dechent, y Suarez, 2008), mundialmente esta técnica es bastante empleada Debido a que en parte ha tenido una gran aceptación ante sismos severos por el excelente comportamiento estructural. (EERI, 2012). (Nagarajaiah, S. and Sun, X., 1996) Dentro los países con mayor número de aplicación resalta Japón, con más de 8000 edificaciones aisladas sísmicamente. (Martelli, A., Clemente, P., De Stefano, A., Forni, M. & Salvatori, A., 2014) y Nueva Zelanda donde en 1990 ya se había implementado el aislamiento en 8 edificaciones y 49 puentes (Skinner et al., 1993). En Latinoamérica el país que ha implementado esta tecnología en mayor número de ocasiones es Chile, con más de 30 edificaciones al año 2008 (Aguilar et al., 2008). En Colombia resalta el aislamiento de base empleado en la institución de salud ubicada en la ciudad de Cali, con 83 aisladores, uno por cada columna, así como el edificio Fundadores de la Universidad Autónoma de Manizales.

2.3 Sistemas de aislamiento sísmico

En el sistema de aislamiento sísmico en la base se instalan dispositivos, generalmente en el nivel más bajo del edificio, con el fin de que absorban, de forma parcial, la energía impuesta por el sismo antes de que sea transmitida a la superestructura, figura 2. Entre los dispositivos empleados en la técnica de aislamiento sísmico, Handson (1993) propone una clasificación de los sistemas de control de la respuesta sísmica:

- a) aisladores sísmicos pasivos como los aisladores de base y los dispositivos suplementarios de disipación de energía,

- b) aisladores sísmicos activos, los cuales requieren una entrada de energía o señal y cuyas características cambian de acuerdo con mediciones de los movimientos de la estructura.

Principalmente el aislamiento activo ha sido usado como complemento de aislamiento pasivo.

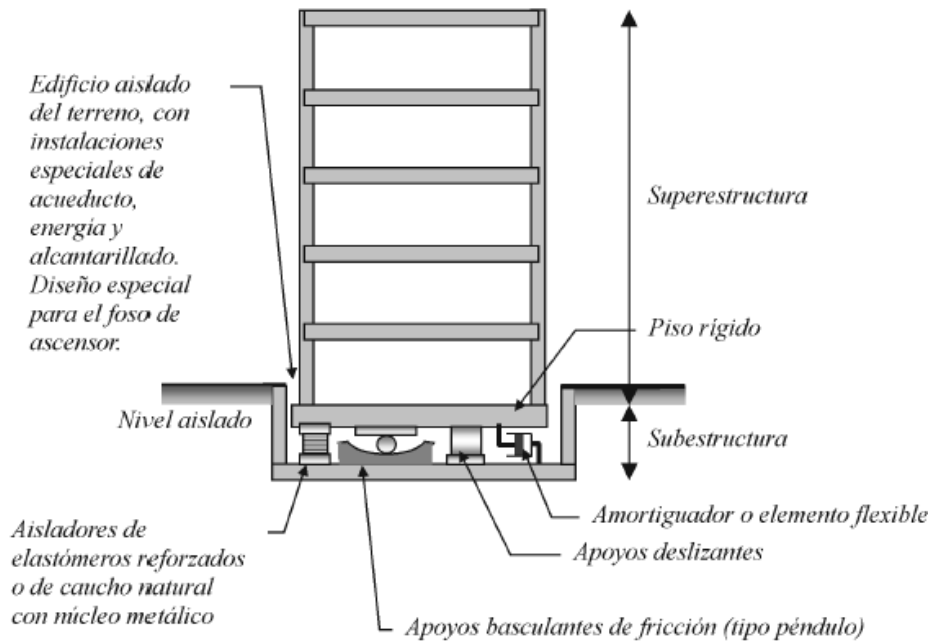


Figura 2. Técnica de aislamiento sísmico en la base Masahiko H. & Okamoto, Shin. (eds). September 2006

En Oviedo et al (2006), se hace un recuento de los tipos de sistemas existentes y se acoge la clasificación propuesta por la ISO 3010 International Standard “Basis for design of structures – Seismic action on structures”, según la cual los sistemas de protección sísmica se clasifican en: de control pasivo, de control activo e híbrido y de control semiactivo, ver tabla 1.

Tabla 1. Clasificación de los sistemas de protección sísmica.

Adaptado de: Masahiko H. & Okamoto, Shin. (eds). September 2006

Sistema de Control	Tipo	Tipo	Dispositivo
Control pasivo	Aislamiento sísmico	Mecanismos deslizantes o de rodillos	Apoyo de rodillos
			Apoyo de placa deslizante, tipo péndulo, basculante
			Capa deslizante
			Otros
		Elemento flexible	Elastómero de multicapas
			Dispositivo flexible
			Otros
	Disipación de energía	De tipo histerético	Acero
			Plomo
			Otros
		De tipo friccionante	
		De tipo fluido	Hidráulico
			Viscoso
			Otros
		De tipo viscoelástico	
	Efecto de masa adicional	De masa y resorte	
		De tipo pendular	
		Vibración de líquido	
		Otros	
	Otro		
Control semiactivo	Control de amortiguamiento	Sistema de amortiguamiento variable	De tipo hidráulico
			Otro
	Control de rigidez	Sistemas de rigidez variable	Riostra
			Otro
Otro			
Control activo e híbrido	Efecto de masa	Amortiguamiento activo de masa	
		Amortiguamiento híbrido de masa	
	Control de fuerza	Tendón activo	
		Otro	
	Otro		

Los factores para determinar qué tipo de aislamientos emplear son (Skinner et al., 1993):

1. Amenaza sísmica: En función de la geología local, registro histórico de sismos, características de sismos de diseños, periodos, severidad, etc...

2. Daño sísmico puede clasificarse como: Menor (1) ; Reparable (2); No reparable (3)

El aislamiento busca llevar todos los daños sísmicos al nivel (1) o menos, buscando un incremento en la resistencia sísmica y una reducción del costo de construcción. Para evaluar costos del aislamiento, se debe tener presente que es +/- del 5 al 10% del costo de construcción y costos de mantenimiento, daños estructura y sus contenidos (Skinner et al., 1993):

Reducción de costos y aumento resistencia sísmica:

1. Reducción de fuerzas sísmicas
2. Reducción demanda de ductilidad
3. Menores deformaciones estructurales

Los aisladores sísmicos proporcionan la suficiente flexibilidad a la estructura para garantizar que su periodo natural difiera del periodo natural del terremoto en la mayor medida posible. Esto evita la aparición de resonancia, que podría conducir a daños severos o incluso al colapso de la estructura (Lafuente et al., 2014)

Como efecto del aislamiento sísmico se obtiene un aumento en la flexibilidad lateral, el desplazamiento de una estructura aislada sin importar el método computacional empleado, puede estar entre 50 a 400 mm, por lo cual es necesario dejar una dilatación o junta sísmica que permita este movimiento (Skinner et al., 1993). Estas juntas sísmicas deben permanecer libre tanto en la estructuras, como en los puentes permitiendo un adecuado movimiento (Skinner et al., 1993).

Los sistemas pasivos son los más utilizados en la actualidad por tal motivo constituyen el objetivo fundamental del presente texto.

2.4 Efectos de los aisladores en la estructura

A continuación se enuncian las consideraciones que difieren en el diseño de edificaciones con aislamiento de base y base fija.

2.4.1 Periodo fundamental y factor de amortiguamiento. Para edificaciones de baja a mediana altura (20 pisos) como el considerado en el capítulo 4 del presente texto, el periodo fundamental es casi siempre inferior a dos segundos y el amortiguamiento suele corresponder a un 5% del crítico. El rango de periodos para edificaciones con aislamiento de base, está aproximadamente entre dos y cuarto segundos y el factor de amortiguamiento puede tomar valores entre 5% y 50% del crítico (dependiendo del sistema de aislamiento seleccionado); la primera circunstancia se debe a la flexibilidad de los aisladores y la segunda a la oportunidad que brinda la concentración de deformaciones en el sistema de aislamiento (Arévalo y López, 2018).

La figura 3 muestra que el incremento alcanzado en el periodo para una estructura aislada en su base, reduce en gran medida la respuesta de aceleración en comparación con la de una estructura de base fija.

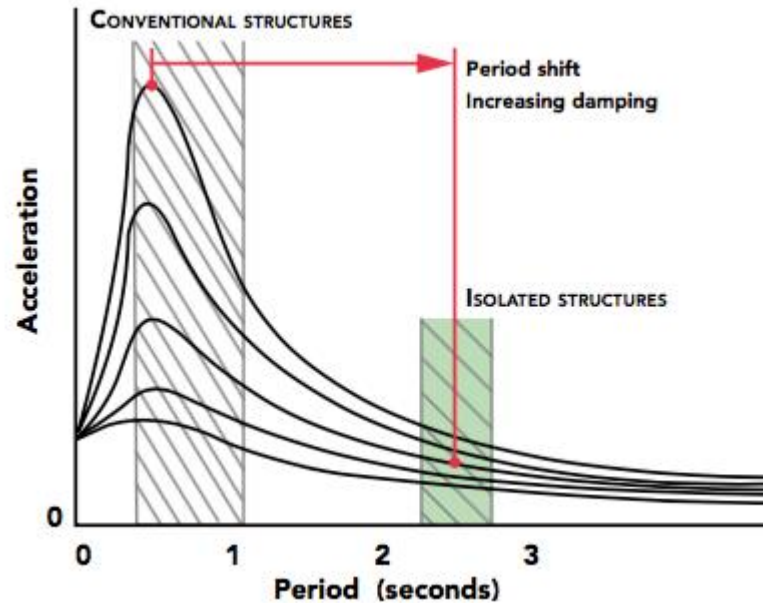


Figura 3. Variación en el Periodo estructura base fija o convencional versus estructura asilada en su base.

DOSHIN RUBBER ENGINEERING (2018) .BASE ISOLATION HIGH DAMPING RUBBER BEARING, Malaysia. Recuperado de: <https://doshinrubber.com/high-damping-rubber-bearing/>

El amortiguamiento en edificaciones de base fija es definido como la disminución de la amplitud de la oscilación a lo largo del tiempo. Cada edificio tiene alguna amortiguación inherente que se debe a la fricción interna de los materiales. Sin amortiguación la edificación oscilante nunca llegaría al reposo, es decir cuanto mayor sea la amortiguación intrínseca del edificio, mejor disipará el edificio la energía de entrada del terremoto.

Según Catálogo de la empresa colombiana E&M el amortiguamiento conseguido, está entre el 10% y el 16 % para aisladores sísmicos de solo goma (HDRB High Damping Rubber Bearing), y del 25% al 30% para aisladores con núcleo de plomo (LRB Lead Core Rubber Bearing).

2.4.2 Espectro de respuesta del sismo. El espectro de NSR-10 es de amenaza uniforme y los parámetros de aceleración de los movimientos sísmicos de diseño están expresados bajo una probabilidad excedencia de 10% en 50 años ($TR = 475$ años). El principal ataque del sismo en la estructura está en el conjunto de fuerzas inerciales que actúan sobre las masas estructurales, y que son generadas por las aceleraciones horizontales del suelo.

En estructuras de baja flexibilidad y bajo amortiguamiento por vibración, las fuerzas sísmicas de diseño son mayores. Estas fuerzas pueden ser reducidas de gran forma, al implementar sistemas que permitan alta flexibilidad horizontal y amortiguación por vibración, siendo este el principio básico del aislamiento sísmico (Skinner et al., 1993 pp. 833). Como se menciona en el ejemplo numérico de Arévalo y López (2018), se cumple lo anterior.

2.4.3 Modos de vibración. Para estructuras con periodos cortos las aceleraciones horizontales de las masas son controladas por el periodo y el amortiguamiento del primer modo de vibración y resuenan a la menor frecuencia. En estructuras aisladas predomina el primer modo y en estructuras sin aislar y con periodos del primer modo hasta 1.0 seg, se encuentran la mayoría de estructuras donde es apropiado emplear el aislamiento (Skinner et al., 1993)

El primer modo de una estructura simplemente aislada es muy diferente de los otros modos, que tienen características similares entre sí. El periodo y el amortiguamiento del primer modo y su respuesta sísmica son determinadas primeramente por un sistema aislado y de características independientes de la estructura (Genatios y Lafuente, 2016). Los desplazamientos horizontales y aceleraciones del primer modo aislado son aproximadamente rectangulares, aumentan en la base con una pequeña deformación de la estructura sobre el aislador y con movimientos casi iguales para todas las masas, por lo tanto una estructura aislada se puede aproximar a una masa rígida

cuando se evalúa la respuesta sísmica del primer modo de vibración, mientras que en una estructura sin aislar los desplazamientos aumentan en altura (Chopra, 2014). Los otros modos de vibración no alteran seriamente la respuesta de la estructura. Casi siempre los desplazamientos relativos al suelo son debidos al primer modo de vibración, tanto para estructuras aisladas como no aisladas (Skinner et al., 1993).

2.4.4 Desempeño sísmico. Las normas de diseño sismo resistente de edificaciones con base fija, en función de la intensidad del sismo exigen generalmente diferentes niveles de desempeño. En Colombia, las leyes por las cuales se adoptan dichos reglamentos ley 400 de 1997, modificada por la ley 1229 de 2008, estipulan en su primer párrafo: “Una edificación diseñada siguiendo los requisitos consagrados en las normas que regulen las construcciones Sismo Resistentes, debe ser capaz de resistir, además de las fuerzas que impone su uso, temblores de poca intensidad sin daño, temblores moderados sin daño estructural, pero posiblemente con algún daño en elementos no estructurales y un temblor fuerte con daños a elementos estructurales y no estructurales pero sin colapso”. Teniendo como objetivo evitar tanto la pérdida de vidas humanas como el colapso global de las estructuras.

Un adecuado diseño sísmico permite que, gracias al comportamiento inelástico de los materiales, la estructura tenga una significativa capacidad de disipar la energía que inyecta el sismo, previendo las zonas de la estructura donde se ubicarán las principales fuentes de disipación de energía (Lafuente et al., 2014). Normalmente se prevé que se formarán “rótulas plásticas” en las vigas primero que en las columnas, y usualmente en zonas de las vigas cercanas a los nodos. De esta forma, se busca controlar los mecanismos de falla de la estructura y evitar el colapso prematuro que pudiera sobrevenir por la ocurrencia de fallas frágiles y repentinas con un buen diseño sísmico

(NSR-10, 2010). Sin embargo, esta filosofía de diseño que implica la aceptación de niveles de daño reparables, para sismos intermedios, y de grandes niveles de daño para sismos excepcionales, puede traer negativas consecuencias económicas y operacionales (Genatios, Lafuente, de 2016).

Por lo tanto el objetivo de garantizar la funcionabilidad en una estructura posterior a un temblor fuerte, ha motivado el desarrollo de tecnologías de aislamiento sísmico y de disipación de energía, que han logrado ser efectivas, tanto en el diseño de nuevas estructuras, como en la rehabilitación de estructuras existentes.

2.5 Objetivos del uso de los aisladores sísmicos

Un aislador sísmico tiene como funcionamiento en generar una discontinuidad en la transmisión del movimiento de la cimentación a la estructura. La energía del sismo de esta manera no se transfiere en la totalidad a la estructura; por lo que la estructura sufre pequeñas deformaciones y se limitan los daños al transmitirse sólo una pequeña porción de ese movimiento de la cimentación. En el régimen elástico la estructura mantiene su respuesta mayormente y hasta puede llegar a comportarse como un cuerpo rígido. Reduciendo de esta manera las demandas de ductilidad de la estructura aislada, generando simplificaciones en el detallado de los miembros estructurales, y en la protección de elementos no estructurales (Genatios, Lafuente, de 2016)

Por otra parte esto también trae ventajas como, menores restricciones para el diseño arquitectónico y mayores posibilidades en la utilización de una amplia variedad de materiales y componentes estructurales.

2.6 Métodos de análisis estructural

Una de las aplicaciones más importantes de la teoría de la dinámica estructural es el análisis de la respuesta de las estructuras a los movimientos del terreno causados por un sismo. Para un sistema inelástico, la ecuación de movimiento que debe resolverse de manera numérica es

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + f_s(u) = p(t) \quad \text{o} \quad -m\ddot{u}_g(t) \quad \text{Ec. (1)}$$

Considerando un sistema estructural idealizado en un modelo de un grado de libertad como el mostrado en la figura 1, se realiza el análisis dinámico para obtener la respuesta del sistema.

La ecuación de equilibrio dinámico de una estructura puede ser desarrollada mediante diferentes métodos:

- Dominio de la frecuencia
- Integración directa
- Modal

2.6.1 Método de análisis dinámico. El análisis dinámico elástico es un procedimiento de tipo matemático que resuelve las ecuaciones del equilibrio dinámico, con la rigidez y resistencia de la estructura constantes y dentro del rango de respuesta lineal, obteniendo las deformaciones y esfuerzos bajo una excitación variante en el tiempo (AIS, 2010). Este análisis en estructuras regulares, determina las cargas incluyendo los efectos de la distribución de la masa, la geometría y el material de la estructura, a diferencia del método de la Fuerza Horizontal Equivalente, basado “en factores y expresiones empíricas, y en la suposición de que el comportamiento estructural está controlado por el primer modo de vibración” (Rochel Awad, 2012)

El análisis dinámico elástico puede ser de dos tipos: espectral, en el que la respuesta dinámica máxima es determinada por la aceleración que corresponde al período de vibración del modo en estudio, ó cronológico, en el que la respuesta dinámica es una función del tiempo y varía con la señal sísmica (AIS, 2010).

2.7 Análisis cronológico lineal

Este método consiste en la evaluación de la estructura durante la ocurrencia de un evento sísmico a través del tiempo conociendo así su posición, los esfuerzos a los cuales se encuentran sometidos los elementos, entre otras características, en cada instante durante la duración del sismo. En este tipo de análisis se somete a la estructura a movimientos sísmicos reales registrados en función del tiempo (acelerogramas). En análisis cronológico lineal NSR-10, (AIS. Marzo de 2010) exige el uso de mínimo 3 acelerogramas diferentes que representen adecuadamente los movimientos esperados en el lugar de estudio, seleccionando como resultado de diseño el más crítico, es decir el valor máximo. Para el caso en el que se usen 7 ó más acelerogramas, debe escogerse el valor promedio de los valores obtenidos de todos los acelerogramas para cualquier dirección (AIS. (Marzo de 2010). p. A-29).

Las ecuaciones de movimiento se resuelven utilizando un método de integración directa paso a paso, aplicando un esquema implícito, en el cual el desplazamiento D_{i+1} corresponde al instante t_{i+1} se obtiene a partir de la ecuación diferencial planteada en el instante t_{i+1} . La respuesta se obtiene por lo tanto como solución de un sistema de ecuaciones algebraicas.

A continuación se estudia las características más importantes del método de integración directa utilizado, el método de Newmark.

2.7.1 Método de Newmark. Los métodos de integración directa permiten encontrar la historia de la respuesta dinámica en el tiempo tanto para sistemas lineales como para sistemas no lineales. Partiendo de la ecuación de movimiento Ec. (1). La respuesta no se obtiene como una función continua sino únicamente en una serie de instantes predefinidos t_i .

En 1959, N. M. Newmark desarrolló una familia de métodos paso a paso en el tiempo basándose en las siguientes ecuaciones:

$$\dot{u}_{i+1} = \dot{u}_i + [(1 - \gamma) \Delta t] \ddot{u}_i + (\gamma \Delta t) \ddot{u}_{i+1} \quad (5.4.1a)$$

$$u_{i+1} = u_i + (\Delta t) \dot{u}_i + [(0.5 - \beta)(\Delta t)^2] \ddot{u}_i + [\beta(\Delta t)^2] \ddot{u}_{i+1} \quad (5.4.1b)$$

Ec. 2 y Ec. 3 (Chopra, 2014)

Los parámetros β y γ definen la variación de la aceleración durante un paso de tiempo y determinan las características de estabilidad y precisión del método. La selección típica de γ es de $\frac{1}{2}$, y $\frac{1}{6} \leq \beta \leq \frac{1}{4}$ es satisfactoria desde todos los puntos de vista, incluido el de la precisión (Chopra, 2014).

Por otra parte, para los sistemas lineales es posible modificar la formulación original de Newmark, a fin de permitir la solución de las ecuaciones Ec. 2 y 3 sin iteración. Como casos especiales del método de Newmark existen, el método de aceleración promedio constante y el método de la aceleración lineal. En (Chopra, A.K. 2014), se demuestra que las ecuaciones de Newmark con $\gamma = \frac{1}{2}$ y $\beta = \frac{1}{4}$ corresponden al supuesto de una variación lineal de la aceleración. En este documento se emplea el método de integración directa de Newmark para dar solución a la ecuación de movimiento de la estructura, con los siguientes valores para los parámetros anteriormente mencionados.

$$\gamma = 1/2$$

$$\beta = 1/4$$

2.7.2 Estimación de las fracciones de amortiguamiento modal. En la tabla 2. Valores de amortiguamiento recomendados (Chopra, A.K. 2014), para el nivel de esfuerzo (Esfuerzo de trabajo), menor de aproximadamente la mitad del punto de cedencia y el tipo y condición de la estructura (Concreto reforzado con grietas considerables), el rango de factor de amortiguamiento es de 3-5. La mayoría de los códigos de construcción no reconocen la variación en el amortiguamiento respecto a los materiales estructurales y, por lo general, existe una fracción de amortiguamiento del 5% implícita en el espectro de diseño y en las fuerzas sísmicas especificadas en el código. Según (Chopra, 2014), las fracciones de amortiguamiento recomendadas pueden utilizarse directamente para el análisis elástico lineal de las estructuras con amortiguamiento clásico.

Tabla 2. Valores de amortiguamiento recomendados (Chopra, A.K. 2014),

Nivel de esfuerzo	Tipo y condición de la estructura	Fracción de amortiguamiento
Esfuerzo de trabajo, menor de aproximadamente la mitad del punto de cedencia	Acero con conexiones soldadas, concreto presforzado, concreto debidamente reforzado (sólo agrietamiento leve)	2-3
	Concreto reforzado con grietas considerables	3-5
	Acero con conexiones atornilladas o remachadas, estructuras de madera con uniones clavadas o atornilladas	5-7
En el punto de cedencia o justo debajo de éste	Acero con conexiones soldadas, concreto presforzado (sin pérdida completa en el presfuerzo)	5-7
	Concreto presforzado con pérdida total del presfuerzo	7-10
	Concreto reforzado	7-10
	Acero con conexiones atornilladas o remachadas, estructuras de madera con uniones atornilladas	10-15
	Estructuras de madera con uniones clavadas	15-20

Fuente: N. M. Newmark y W. J. Hall, *Earthquake Spectra and Design*, Earthquake Engineering Research Institute, Berkeley, California, 1982.

2.7.3 Matriz de amortiguamiento clásico. El amortiguamiento clásico es una idealización apropiada si los mecanismos de amortiguamiento que se distribuyen a lo largo de toda la estructura son similares (por ejemplo, un edificio de varios niveles con un sistema estructural y materiales estructurales semejantes en toda su altura). A continuación se enuncian el procedimiento a fin de construir una matriz de amortiguamiento clásico para una estructura a partir de las fracciones de amortiguamiento modal.

2.7.4 Amortiguamiento de Rayleigh. Como un primer paso hacia la construcción de una matriz de amortiguamiento que sea en cierta medida consistente con los datos experimentales, se considera el amortiguamiento de Rayleigh:

$$\mathbf{c} = a_0 \mathbf{m} + a_1 \mathbf{k}$$

Ec. (4)

La fracción de amortiguamiento para el n-ésimo modo de tal sistema es

$$\zeta_n = \frac{a_0}{2} \frac{1}{\omega_n} + \frac{a_1}{2} \omega_n$$

Ec. (5)

Los coeficientes a_0 y a_1 pueden determinarse a partir de las fracciones de amortiguamiento especificadas ζ_i y ζ_j para los modos i-ésimo y j-ésimo, respectivamente. Si la Ec. (5) para estos dos modos se expresa en forma matricial, resulta

$$\frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1/\omega_i & \omega_i \\ 1/\omega_j & \omega_j \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} a_0 \\ a_1 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \zeta_i \\ \zeta_j \end{Bmatrix}$$

Ec. (6)

Estas dos ecuaciones algebraicas pueden resolverse para determinar los coeficientes a_0 y a_1 . Si se supone que ambos modos tienen la misma fracción de amortiguamiento ζ , lo cual es razonable con base en los datos experimentales, (Chopra, A.K. 2014), entonces

$$a_0 = \zeta \frac{2\omega_i\omega_j}{\omega_i + \omega_j} \quad a_1 = \zeta \frac{2}{\omega_i + \omega_j}$$

Ec.(7)

Ahora, la matriz de amortiguamiento se conoce a partir de la Ec. (4) y la fracción de amortiguamiento para cualquier otro modo, dada por la ecuación Ec. (5), varía con la frecuencia natural, como se muestra en la figura 1.

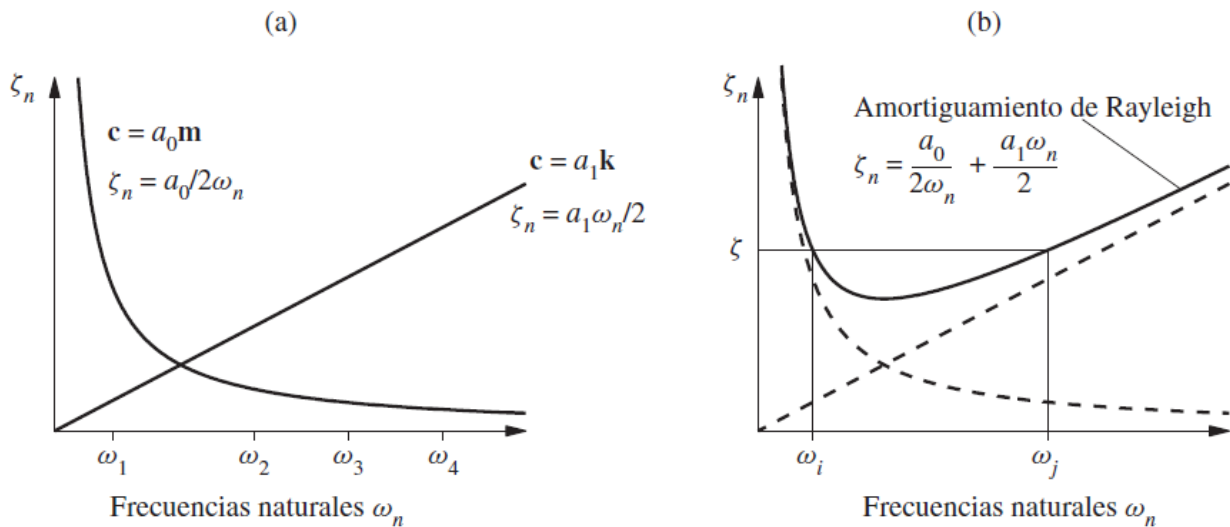


Figura 11.4.2 Variación de las fracciones de amortiguamiento modal con la frecuencia natural: (a) amortiguamientos proporcionales a la masa y a la rigidez; (b) amortiguamiento de Rayleigh.

Figura 4. Variación de las fracciones de amortiguamiento modal con la frecuencia natural: (a) amortiguamientos proporcionales a la masa y a la rigidez; (b) amortiguamiento de Rayleigh. Tomado de: (Chopra, A.K. 2014),

Al aplicar este procedimiento a un problema práctico, los modos i y j con las fracciones de amortiguamiento especificadas deben elegirse de manera que garanticen valores razonables para las fracciones de amortiguamiento en todos los modos que contribuyen de manera significativa a la respuesta.

Si se desean especificar valores para las fracciones de amortiguamiento en más de dos modos, debe tenerse en cuenta la forma general de una matriz de amortiguamiento clásico (Chopra, A.K. 2014), conocida como el amortiguamiento de Caughey.

2.8 Tratamiento de señales o acelerogramas

Los acelerogramas consisten en una serie de datos aceleración vs tiempo los cuales representan el movimiento que experimenta el suelo en un determinado punto durante un evento sísmico.

Para el empleo de acelerogramas reales en un análisis cronológico se debe garantizar que estos sean representativos de los movimientos a los cuales puede ser sometida la estructura, es decir que tenga valores o características similares en cuanto a distancias hipo centrales o falla causante, mecanismos de ruptura y condiciones geológicas.

2.8.1 Corrección de los acelerogramas. Usualmente los registros sísmicos presentan alteraciones las cuales deben ser corregidos para poder ser empleados en un análisis dinámico, dichas alteraciones son introducidas debido a múltiples factores, como lo son la falta de calibración del instrumento, la sensibilidad del mismo, el registro de vibraciones ajenas al sismo, entre otras.

Una de las principales correcciones que se debe realizar consiste en la corrección de la línea base o corrección de ceros, esto se debe a que en ocasiones los valores registrados por el

acelerógrafo se encuentran desplazados respecto a la línea inicial de aceleración cero, esto puede ocurrir debido a que el acelerógrafo no se encuentra perfectamente nivelado, o por que el sistema de registro provoca una deriva de los datos respecto de la línea base.

La corrección de la línea base se realiza empleando un análisis de regresión, con el fin de obtener la curva polinomial que mejor se ajuste al grupo de valores de tiempo-aceleración, restando de los valores actuales de aceleración sus valores correspondientes obtenidos con la ecuación derivada de la regresión. De esta manera se busca eliminar el movimiento de entrada inicial de la línea base, los cuales son más notables en los diagramas de desplazamiento vs tiempo, el cual es obtenido de la doble integración de los acelerogramas los cuales relacionan aceleración vs tiempo (Martelli, A., Clemente, P., De Stefano, A., Forni, M. & Salvatori, A., 2014).

Además de la corrección de la línea base se debe realizar otras correcciones al acelerograma original para ser empleado en un análisis dinámico, el filtrado del acelerograma consiste en eliminar las componentes de frecuencia no deseados de una señal, eligiendo el rango de frecuencias que se quiere retirar del registro, determinando un límite inferior y superior.

Existen varios métodos para realizar los diferentes tipos de filtrado mencionados anteriormente, el método de Butterworth, de Chebyshev y de Bessel, se empleará el método de Butterworth debido a que genera una respuesta prácticamente sin desviación (Martelli, A., Clemente, P., De Stefano, A., Forni, M. & Salvatori, A., 2014)

2.8.2 Escalamiento de los acelerogramas. El escalamiento de un acelerograma consiste en la modificación de un acelerograma, variando distintos parámetros que lo definen como la aceleración pico, contenido de frecuencias, duración del movimiento. En otras palabras, el escalamiento se refiere a la multiplicación de un registro inicial por un valor constante de tal

manera que el acelerograma escalado tenga valores de aceleración que coincidan con el espectro de diseño para un rango de periodos de interés.

Existen diferentes métodos de escalamiento dentro de los cuales se pueden identificar:

Escalamiento respecto a la aceleración pico o aceleración máxima del suelo: consiste en multiplicar el registro sísmico o espectro por una constante o factor escalar el cual es obtenido de la siguiente manera:

$$\alpha = (\text{Aceleracion maxima del suelo}) / (\text{Aceleracion maxima del acelerograma})$$

Escalamiento compatible con un espectro objetivo en un rango de periodos determinado, este escalamiento se realiza a partir de espectro elástico definido para el lugar de estudio, escalándolo en el dominio del tiempo.

En ésta metodología, los registros sísmicos son escalados incrementando o disminuyendo las amplitudes por un factor escala uniforme en todo el registro sísmico. El procedimiento está basado en minimizar las diferencias en los espectros de respuesta de los registros escalados y el espectro de diseño en el sentido de mínimos cuadrados (Almazán, J. 2012).

2.9 Análisis modal espectral

El análisis del espectro de respuesta (RSA) es un método de análisis estadístico lineal dinámico que mide la contribución de cada modo natural de vibración para indicar la respuesta sísmica máxima probable de una estructura esencialmente elástica. El análisis del espectro de respuesta proporciona información sobre el comportamiento dinámico al medir la aceleración, velocidad o desplazamiento pseudo-espectral en función del período estructural para un historial de tiempo y nivel de amortiguamiento determinados. El análisis del espectro de respuesta es útil para la toma

de decisiones de diseño porque relaciona la selección de tipo estructural con el desempeño dinámico. Las estructuras de un período más corto experimentan una mayor aceleración, mientras que las de un período más largo experimentan un mayor desplazamiento. El periodo fundamental de la estructura se calcula mediante un procedimiento de análisis que considera la distribución de masas de la estructura y la rigidez.

A continuación se enuncia el procedimiento del análisis modal para determinar la respuesta de una estructura a un movimiento del terreno inducido por un sismo $\ddot{u}_g(t)$, idéntico en todos los puntos de apoyo de la estructura.

2.9.1 Ecuaciones de movimiento. Ecuaciones diferenciales que controlan la respuesta de un sistema de VGDL a un movimiento inducido por un sismo:

$$\mathbf{m}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{c}\dot{\mathbf{u}} + \mathbf{k}\mathbf{u} = \mathbf{p}_{ef}(t) \quad Ec. (8)$$

donde

$$\mathbf{p}_{ef}(t) = -\mathbf{m}\mathbf{L}\ddot{u}_g(t) \quad Ec (9)$$

Las matrices de masa y rigidez, son respectivamente $\mathbf{m}$ y $\mathbf{k}$, y el vector de influencia $\mathbf{i}$. La matriz de amortiguamiento $\mathbf{c}$ no es necesaria en el análisis modal de la respuesta sísmica; en su lugar, son suficientes las fracciones de amortiguamiento modal

2.9.2 Desplazamientos y fuerzas. El desplazamiento $\mathbf{u}$ de un sistema con N grados de libertad puede expresarse, como la superposición de las contribuciones modales:

$$\mathbf{u}(t) = \sum_{n=1}^N \phi_n q_n(t) \quad Ec. (10)$$

La distribución espacial de las fuerzas sísmicas efectivas $P_{ef}(t)$ está denida por $s = m\ddot{u}$. Esta distribución de fuerza puede expandirse como la sumatoria de las distribuciones de fuerza inercial modal S_n

$$\mathbf{m}\ddot{u} = \sum_{n=1}^N \mathbf{s}_n = \sum_{n=1}^N \Gamma_n \mathbf{m} \phi_n \quad Ec. (11)$$

donde

$$\Gamma_n = \frac{L_n}{M_n} \quad L_n = \phi_n^T \mathbf{m} \ddot{u} \quad M_n = \phi_n^T \mathbf{m} \phi_n \quad Ec. (12)$$

La contribución del n-ésimo modo a $m\ddot{u}$ es

$$\mathbf{s}_n = \Gamma_n \mathbf{m} \phi_n \quad Ec. (13)$$

La contribución del n-ésimo modo a los desplazamientos nodales $u(t)$ es

$$\mathbf{u}_n(t) = \phi_n q_n(t) = \Gamma_n \phi_n D_n(t) \quad Ec. (14)$$

La combinación de las contribuciones de respuesta de todos los modos proporciona la respuesta total de la estructura al movimiento del terreno. Por lo tanto los desplazamientos nodales son:

$$\mathbf{u}(t) = \sum_{n=1}^N \mathbf{u}_n(t) = \sum_{n=1}^N \Gamma_n \phi_n D_n(t) \quad Ec.(15)$$

3.0 Dispositivos de aislamiento pasivo

Los dispositivos de aislamiento se definen por un conjunto particular de características tales como: rigidez y deformaciones correspondientes de la carga de servicio, límite de elasticidad y desplazamientos máximos bajo cargas extremas de terremoto, desplazamientos residuales y la

capacidad de regresar a la posición inicial (resistencia), rigidez vertical, etc. Este capítulo describirá los parámetros mencionados anteriormente para dos tipos de dispositivos disponibles actualmente en el mercado, y a emplear en el caso de estudio.

3.1 Aisladores elastoméricos con núcleo de plomo de la serie LRB (Lead Rubber bearings)

Son apoyos de caucho reforzado material elastomérico, conformados por capas alternadas de acero y caucho unidos a través de la vulcanización, con un núcleo central de plomo de forma cilíndrica. El núcleo de plomo experimenta una deformación plástica bajo acciones de carga, disipando energía en forma de calor, lo cual permite obtener un coeficiente de amortiguación viscosa hasta alrededor del 30% (Catálogo RB. FIP INDUSTRIALE S.r.L.)

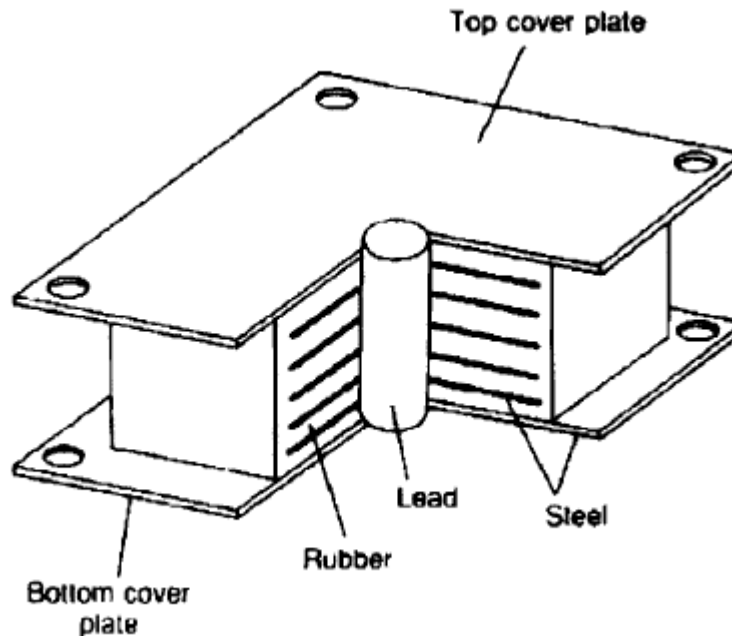


Figura 5. Aislador elastoméricos con núcleo de plomo LRB.

Adaptado de Kunde, M. and R. Jangid (2003). Seismic behavior of isolated bridges: A state-of-the-art review. Electronic Journal of Structural Engineering 3, 140-170. 9, 18, 19, 20, 21, from <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.469.9074&rep=rep1&type=pdf>

3.1.1 Parámetros de cálculo. Se presenta el típico diagrama histérico fuerza- desplazamiento bilineal de un aislador elastomérico con núcleo de plomo. Los parámetros d_1, F_1, d_2, F_2 que definen la curva bilineal para cada LBR se indican en el catálogo proporcionado por el fabricante (Catálogo RB. FIP INDUSTRIALE S.r.L.)

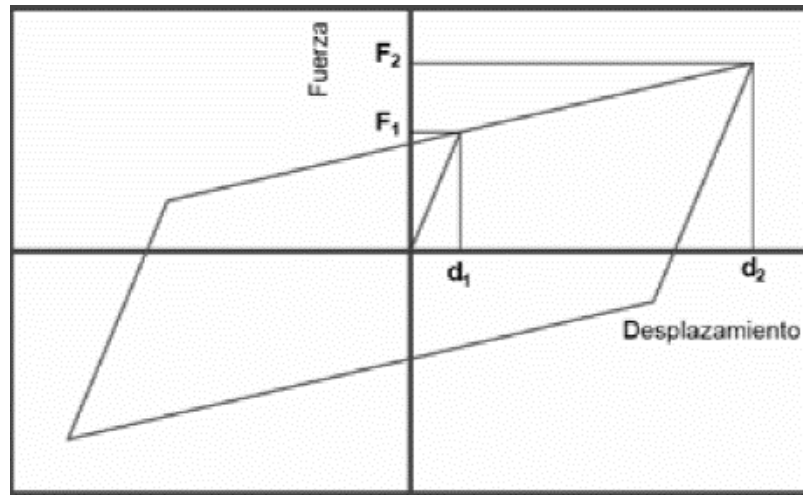


Figura 6. Bucle histérico fuerza- desplazamiento de un aislador elastomérico con núcleo de plomo.

Tomado de: Catálogo RB. FIP INDUSTRIALE S.r.L.

El comportamiento histérico de un LRB puede ser lineal a través de la rigidez efectiva K_e y del coeficiente de amortiguación viscosa equivalente ξ_e , las cuales dependen del desplazamiento máximo de d_2 y de la fuerza correspondiente F_2 a la cual se refieren:

$$K_e = \frac{F_2}{d_2}$$

Ec. (16)

$$\xi_e = \frac{2}{\pi} * \left[\frac{F_1}{F_2} - \frac{d_1}{d_2} \right]$$

Ec. (17)

Los valores de K_e y ξ_e en las tablas del catálogo del fabricante (Catálogo RB. FIP INDUSTRIALE S.r.L.) se refieren al desplazamiento d_2 (desplazamiento máximo del proyecto) y se pueden calcular para distintos tipos de desplazamientos. La figura 7 muestra la variación típica de K_e y ξ_e en función de la deformación de corte γ del caucho, para el aislador LRB-S 800/200-175. La Figura 8 y 9 presenta el aislador elastomérico con núcleo de plomo.

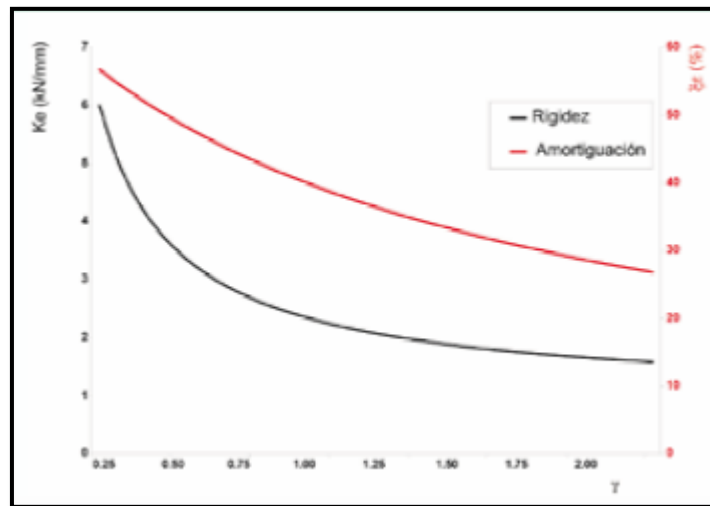


Figura 7 Variación de la rigidez efectiva y del coeficiente de amortiguación viscosa equivalente típicos en función de la deformación por cortante.

(Catálogo RB. FIP INDUSTRIALE S.r.L.).

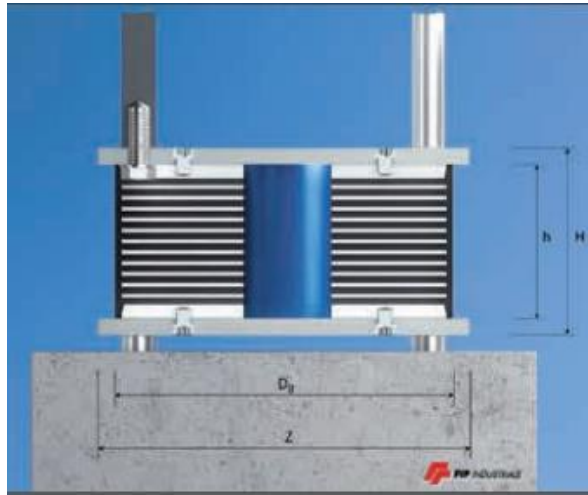


Figura 8 Aislador elastomérico con núcleo de plomo.

(Catálogo RB. FIP INDUSTRIALE S.r.L.).



Figura 9. Aislador con Núcleo de Plomo LASTO®LRB

(International www.mageba.net)

3.1.2 Propiedades de los materiales. La mezcla de caucho normalmente empleada en la fabricación de los LRB se caracteriza por un módulo elástico dinámico equivalente G_{din} de 0.4 MPa para la mezcla S, y 0.6 MPa para la mezcla SN.

3.1.3 Comportamiento bilineal estable. El aislador presenta un comportamiento bilineal estable a continuación se presenta la curvas de histéresis que es una característica de todos los materiales o sistemas estructurales que disipan la energía, propocionadas por el fabricante (Catálogo RB. FIP INDUSTRIALE S.r.L.).

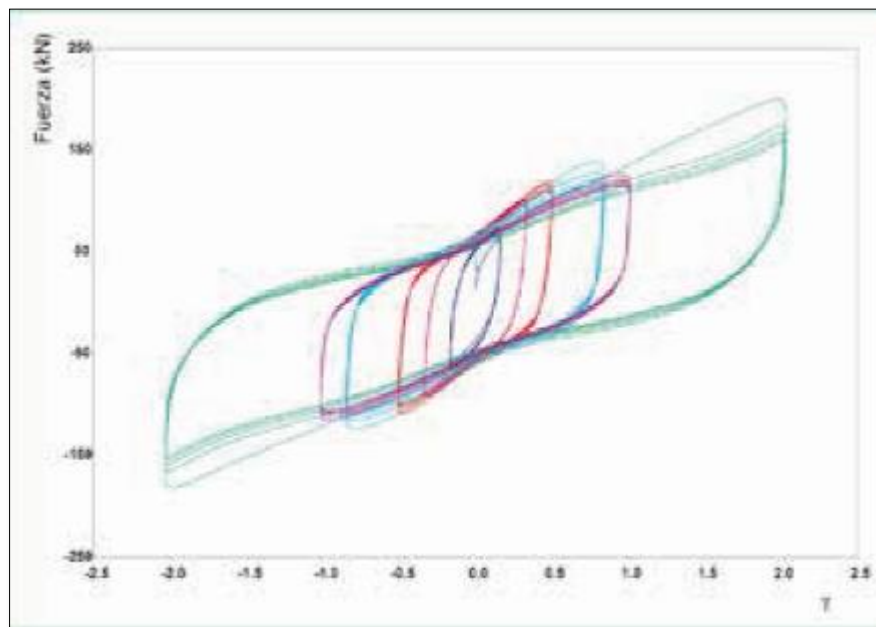


Figura 10. Ciclos histéreticos de los aisladores elastomérico con núcleo de plomo típico obtenidos a través de ensayos dinámicos con amplitud creciente. .

(Catálogo RB. FIP INDUSTRIALE S.r.L.).

3.2 Aisladores elastoméricos de alta amortiguación (High Damping Rubber Bearings)

El apoyo elastomérico de alta amortiguación consiste en un elastómero reforzado con acero, se basa en el principio de aislamiento de base y limita la energía transferida del terreno a la estructura en caso de presentarse un terremoto. El elastómero consigue aislar y recentrar la estructura tras un sismo, logrando un amortiguamiento de hasta un 16%, frente al 5% de apoyos elastoméricos convencionales según Catálogo de la empresa colombiana E&M. Tiene un aspecto muy similar al aislador de núcleo de plomo, pero son de naturaleza totalmente diferente. El aislador de alta amortiguación es laminado con capas de acero sin ningún núcleo de plomo.

3.2.1 Propiedades de los materiales. Consiste en capas alternas de material elastómero y láminas de acero vulcanizado. Este apoyo proporciona un alto grado de amortiguación, de hasta el 16%, debido al uso de un compuesto elastomérico mejorado que proporciona mayor capacidad de amortiguación de viscosidad y desplazamiento, así como una alta resistencia al desgaste mecánico, durabilidad. La lámina de caucho de alto amortiguamiento es de naturaleza muy rígida; sin embargo, durante un terremoto, se vuelve muy flexible en dirección horizontal, de modo que pueden reducir la fuerza del terremoto en el edificio al cambiar su propia forma, y posteriormente puede volver a su forma original después de un terremoto debido a su alta propiedad elastomérica DOSHIN RUBBER, (2018).

3.2.2 Comportamiento bilineal estable. El aislador presenta un comportamiento bilineal estable a continuación se presenta la curvas de histéresis, que es una característica de todos los materiales o sistemas estructurales que disipan la energía, para un aislador HRDB del catálogo (Zaoqiang Dacheng Rubber, 2014), donde se muestran que el aislador de elastomérico de alta amortiguación es confiable en cuanto a durabilidad y seguridad de rendimiento a largo plazo.

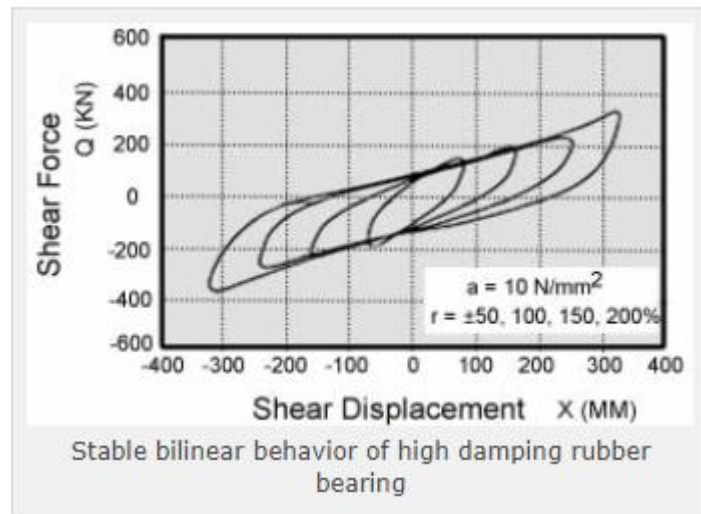


Figura 11. Gráfico de comportamiento bilineal de HDRB
(Zaoqiang Dacheng Rubber Co, 2014).

4.0 Análisis de modelos de estructuras aisladas

4.1 Consideraciones y criterios de modelamiento

Según empresa fabricante de aisladores sísmicos, MAGEBA, (2013) y Lafuente (2016), un sistema efectivo de aislamiento sísmico debe presentar las siguientes funciones principales:

- Rendimiento óptimo bajo cargas de servicio, verticales y horizontales, siendo tan eficaz como un apoyo estructural convencional.
- Proporcionar la suficiente flexibilidad horizontal para alcanzar el periodo natural deseado para la estructura aislada.

- Capacidad de recentrado después de la ocurrencia de un gran terremoto para que ningún desplazamiento residual pueda alterar la capacidad de servicio de la estructura.
- Proporcionar un nivel de disipación de energía adecuado con el fin de controlar los desplazamientos que podrían dañar otros elementos estructurales

En el modelamiento se realiza el control de los siguientes parámetros, capacidad de carga, rigidez lateral y desplazamientos máximos que se van a desarrollar en los aisladores a emplear.

Capacidad de carga y tracción: De acuerdo al peso de la edificación se definen de forma que no se exceda la capacidad de carga de cada aislador, la cantidad de aisladores a implementar. Siendo un análisis preliminar debido a que existirán diferencias entre las cargas permanentes y las cargas cuando ocurren los sismos.

Durante un evento sísmico, los momentos generados van a esforzar verticalmente a unos aisladores más que otros; por tal motivo se hace un control de la capacidad de carga cuando se utiliza una combinación que incluya el sismo y las cargas muerta.

Cuando un lado se sobrecarga más existe la tendencia de que en el otro lado algunos aisladores no trabajen a compresión y se encuentren en tracción. Este parámetro se controla con una combinación del sismo más el peso del edificio que trata de estabilizar el momento volcante producido (Korswagen P., Arias J. y Huaranga P. 2012)

4.2 Ventajas de la implementación de aisladores en estructuras

Según Genatios y Lafuente (2016), (Arévalo y López, 2018) las siguientes son ventajas del uso de aislamiento de base:

- Reducción de las fuerzas sísmicas transmitidas a una estructura, protegiendo no sólo la estructura en sí, sino también sus contenidos y elementos no estructurales, siendo importante en edificaciones que requieren garantizar su funcionabilidad después de un sismo
- A nivel mundial tiene una gran aceptación, es aplicable a puentes y estructuras industriales, además de edificios. Es adecuado para la mejora de edificios existentes.
- La capacidad de proteger los contenidos es una gran ventaja para edificios como hospitales y centros de emergencia donde se necesita el mantenimiento de funciones durante y después de un terremoto, y en casos como museos y fábricas de tecnología avanzada donde el valor de los contenidos es alto.
- En aislamiento sísmico, parte o toda la superestructura está separada de la parte inferior de la estructura por una interfaz que es suave y flexible en la dirección horizontal. En general, la interfaz se coloca entre la cimentación o el sótano y el suelo, por lo que el término aislamiento de base se puede aplicar con precisión.
- Minimiza el efecto del movimiento del suelo en la superestructura mediante el aislamiento de su cimentación.

5. Metodología para determinar las características mecánicas de aisladores LRB y HDRB

5.1 Característica mecánicas del Aislador de base LRB (Lead-Rubber Bearing)

Con la finalidad de alimentar el modelo numérico de la estructura a aislar, se realiza la determinación de las propiedades mecánicas del aislador de base LRB (Lead-Rubber Bearing) según lo señalado en la norma ASCE/SEI 7-16, teniendo en cuenta que NSR-10 remite el diseño a la norma ASCE/SEI 7-05 la cual no es una versión vigente.

En el capítulo 17 de la norma ASCE/SEI 7-16, el cual se titula requisitos de diseño sísmico para estructuras sísmicamente aisladas, la ecuación 17.5 -2 permite hallar la rigidez horizontal que se necesita para el sistema aislado.

$$T_M = 2\pi \sqrt{\frac{W}{k_M g}} \quad (17.5-2)$$

Ecuación 18

Donde:

W= Peso sísmico efectivo de la estructura sobre la interface del sistema de aislamiento.

Km = rigidez mínima efectiva para el sistema de aislamiento en la dirección horizontal bajo consideración.

g = aceleración causada por la gravedad.

Partiendo de la Ecuación 18, se obtiene el valor de la rigidez horizontal (Km) para ser dividida por el número de aisladores a implementar en el sistema.

$$K_{TOTAL} = \frac{4 * \pi^2 * W}{T_D^2 * g} \quad \text{Ecuación 19}$$

$$K = \frac{K_{TOTAL}}{n} \quad \text{Ecuación 20}$$

Donde:

W = Peso total de la estructura, KN

TD = Periodo de diseño de la estructura, s

g = Aceleración de la gravedad, 9.81 m/s²

El objetivo de implementar el aislador consiste en incrementar el periodo fundamental de la estructura aislada con el fin de obtener aceleraciones y cortantes menores, por tal motivo y teniendo en cuenta que en edificaciones con aislamiento de base, el rango de periodos está aproximadamente entre 2 y 4 segundos (Arévalo, C.M. y López A. F., 2018). Para el caso de estudio se asumió en un rango de 2 a 4 segundos la diferencia entre el periodo de la edificación con base fija y la estructura aislada.

Según Catálogo de la empresa colombiana E&M el amortiguamiento conseguido, está entre el 25% al 30% para aisladores con núcleo de plomo (LRB Lead Core Rubber Bearing) .

5.2 Característica mecánicas del Aislador de base HDRB (High Damping Rubber Bearings)

Para el diseño del sistema de base aislada con aislador de base HDRB (High Damping Rubber Bearings) a implementar, se seguirá el procedimiento de diseño señalado en la norma ASCE/SEI 7-16, teniendo en cuenta que NSR-10 remite el diseño a la norma ASCE/SEI 7-05 la cual no es una versión vigente. El procedimiento se realizará según la metodología propuesta por (ARRIAGADA, J. A. 2005) , ASCE/SEI 7-10.

Una vez determinado en el capítulo anterior la cantidad de aisladores, el peso sísmico de la estructura sobre el sistema de aislación, el periodo objetivo y las cargas máximas y mínimas que actuaran sobre el aislador, previamente al diseño se establece lo siguiente:

- Límites de deformación de corte directa máxima γ_s y de la deformación de corte máxima admisible $\gamma_{m\acute{a}x}$.
- Valor de amortiguamiento βM y determinar de acuerdo con la tabla 17.5-1 del ASCE/SEI 7-16 el factor de amortiguamiento del sistema BM .
- Cálculo del desplazamiento máximo DM de acuerdo a la ecuación 17.5-1 del ASCE/SEI 7-16.
- Definición de la tensión admisible de compresión σ_{AC} .

Posteriormente se realiza de manera iterativa para el cálculo los siguientes pasos definidos en el siguiente diagrama de flujo, ver figura 12, con el fin de dar cumplimiento a los chequeos requeridos.

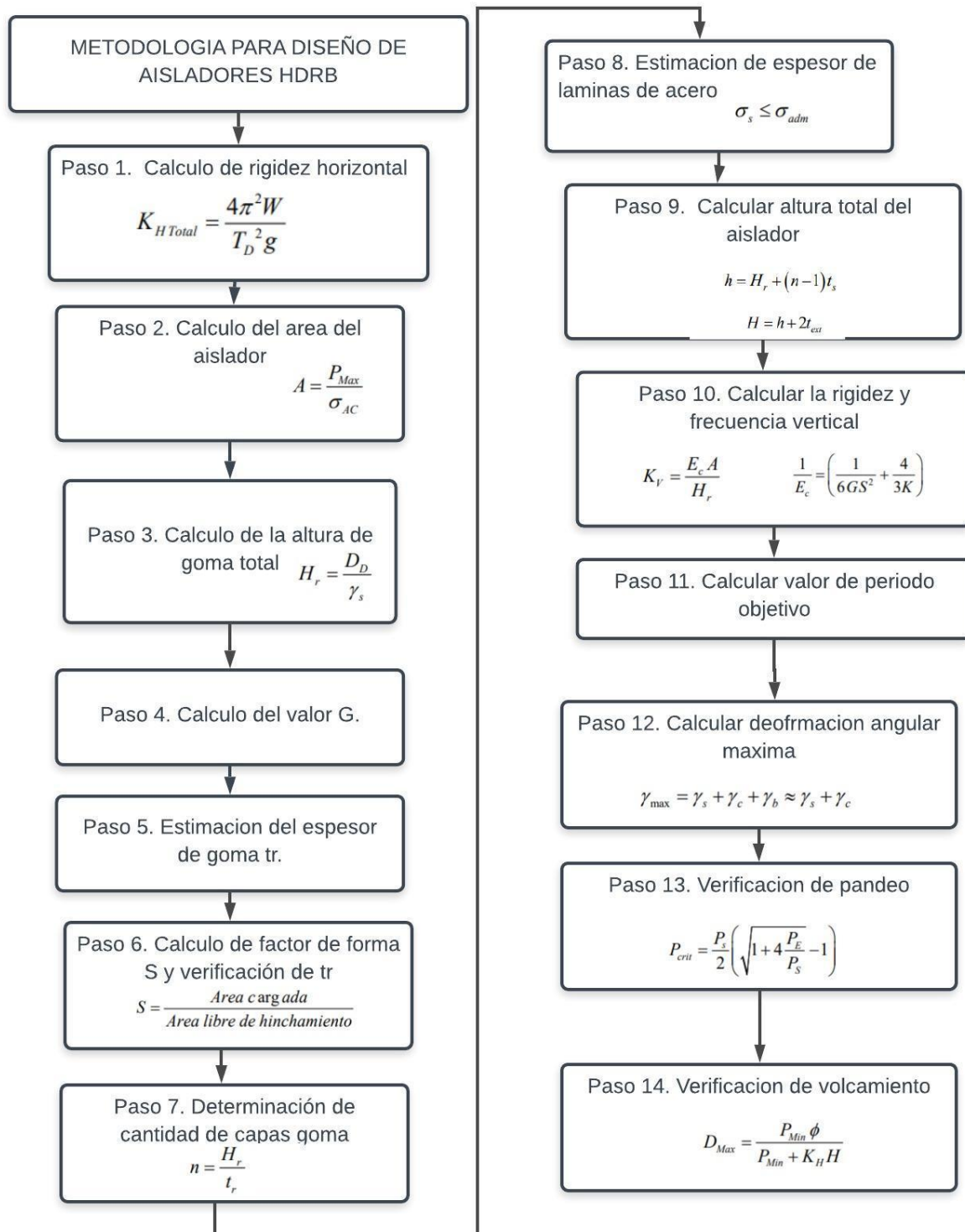


Figura 12. Diagrama de flujo metodología para diseño de aisladores HDRB

No se hace verificación de volcamiento ya que se diseña el aislador con conexión por pernos.

6. Caso de estudio: Aislamiento de base en edificación educativa con grupo de uso: tres.

6.1 Descripción de la edificación

La estructura estudiada corresponde a una edificación con sistema estructural tipo pórtico, en concreto, ubicada en Bucaramanga, Santander, zona de amenaza sísmica alta perteneciente al grupo de ocupación III, Edificaciones de atención a la comunidad. 3. La estructura cuenta con 3 niveles incluyendo cubierta, con altura de entrepiso de 3.50 m, 6 ejes de columnas en la dirección Y, y 3 ejes de columnas en la dirección X, con sistema de entrepiso formado por placa maciza y vigas, con un tipo ocupación educativo.

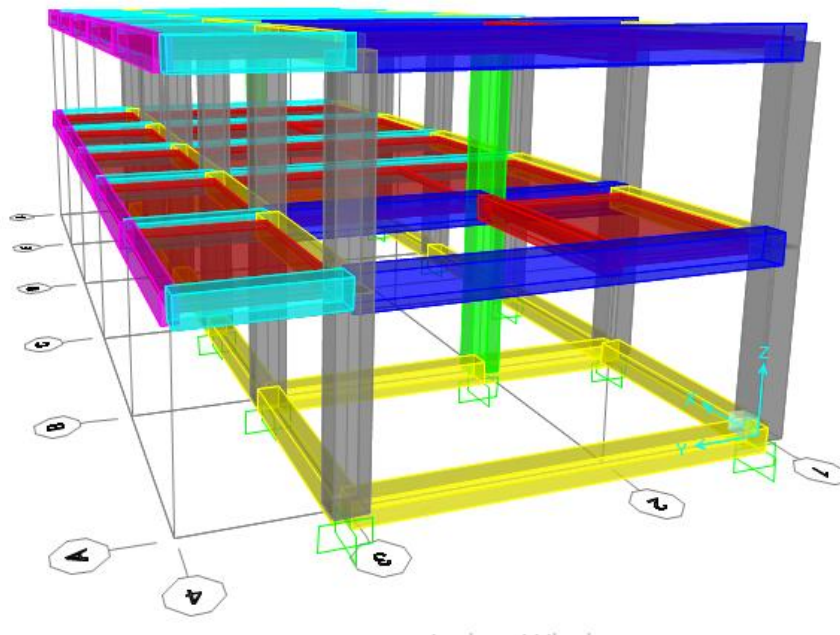


Figura 13. Estructura original

Tabla 3 Materiales de la edificación

MATERIALES				
	<u>NOMBRE</u>	<u>RESISTENCIA</u>	<u>MODULO ELASTICIDAD</u>	
CONCRETO	3000 Psi	21 M Pa	21538.105 M Pa	
		<u>Fy</u>	<u>Fu</u>	<u>MODULO ELASTICIDAD</u>
	ASTM A706 GR			
ACERO DE REFUERZO	60	413.68 M Pa	551.5806 M Pa	199947.98 M Pa

Tabla 4. Elementos estructurales de la edificación

DEFINICION DE ELEMENTOS				
NOMBRE	MATERIALES	BASE	ALTURA	
VIGA 45X45	CONCRETO 3000 PSI ACERO ASTM 706 GR 60	45 CM	45 CM	
VIGA 45X60	CONCRETO 3000 PSI ACERO ASTM 706 GR 60	45 CM	60 CM	
VIGA 45X50	CONCRETO 3000 PSI ACERO ASTM 706 GR 60	45 CM	50 CM	
VIGA 30X50	CONCRETO 3000 PSI ACERO ASTM 706 GR 60	45 CM	50 CM	
VIGA 25 X 50	CONCRETO 3000 PSI ACERO ASTM 706 GR 60	25 CM	50 CM	
COLUMNA 50X60	CONCRETO 3000 PSI ACERO ASTM 706 GR 60	25 CM	50 CM	
COLUMNA 45X60	CONCRETO 3000 PSI ACERO ASTM 706 GR 60	25 CM	50 CM	
LOSA ENTREPISO	TIPO SHELL-MEMBRANA	ESPESOR 15 CM	CONCRETO 3000PSI	ACERO ASTM 706GR60

6.2 Método de análisis

El análisis dinámico de la edificación se realizó empleando dos métodos de análisis: Modal espectral y cronológico lineal. Para el primero, se define un espectro de diseño de acuerdo con el NSR-10 A2.6. Para el análisis cronológico se deben emplear familias de acelerogramas, los cuales fueron obtenidos de la microzonificación sísmica del área metropolitana de Bucaramanga, y

corregidos en el software SeismoSignal 2018, y escalados al espectro de diseño planteado para el análisis modal espectral con los parámetros presentados a continuación con el uso del software SeismoMatch 2018, de acuerdo al diagrama de flujo presentado en la figura 13 y la figura 14.

El análisis modal espectral fue realizado considerando un amortiguamiento de la estructura del 5%, la combinación modal y la combinación direccional se realiza empleando el método de la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados (SRSS).

El análisis cronológico lineal fue realizado empleando el método de integración directa de Newmark para dar solución a la ecuación de movimiento de la estructura.

Valores empleados para método de integración directa de Newmark

$$\gamma = 1/2$$

$$\beta = 1/4$$

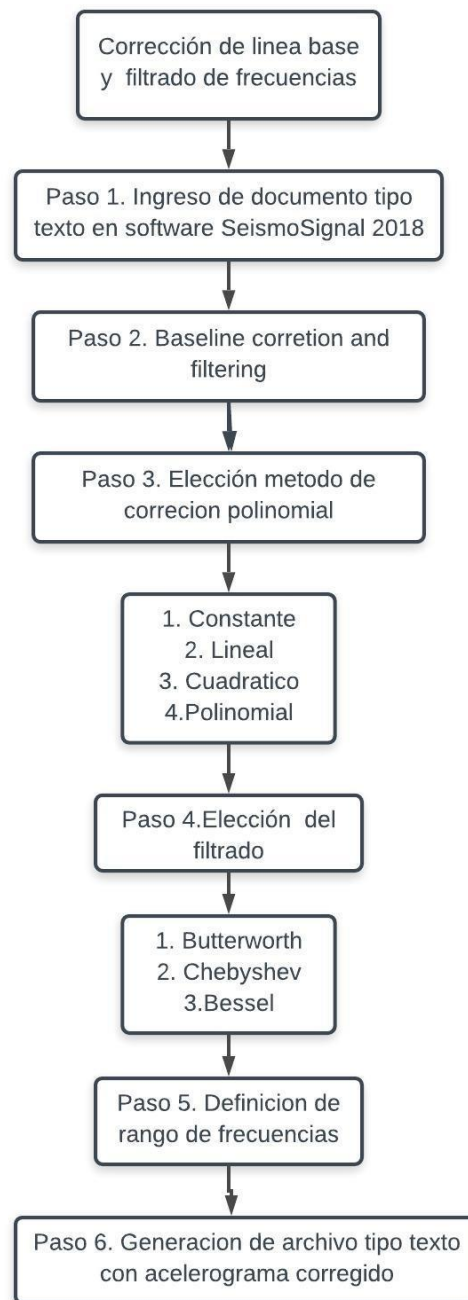


Figura 14 Procedimiento para corrección de acelerogramas en software SeismoSignal 2018

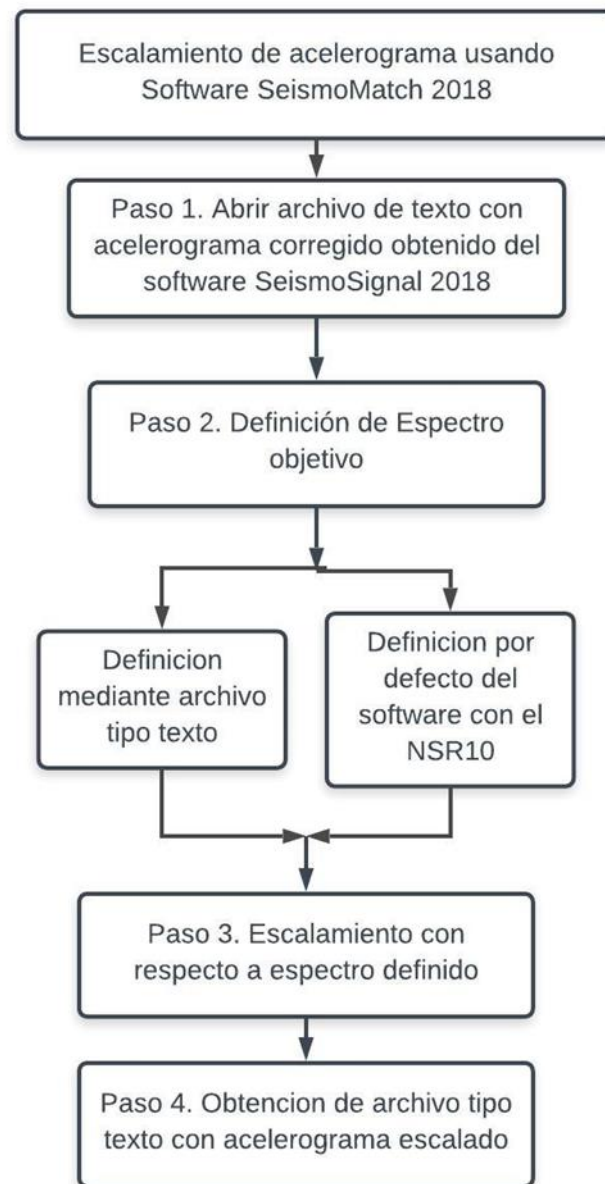


Figura 15. Procedimiento para corrección de acelerogramas en software SeismoMatch 2018

Tabla 5. Características del análisis dinámico

Aa	Av	Fa	Fv	I	Tc	To	TL
0.25	0.25	1.15	1.55	1.25	0.647	0.135	3.720

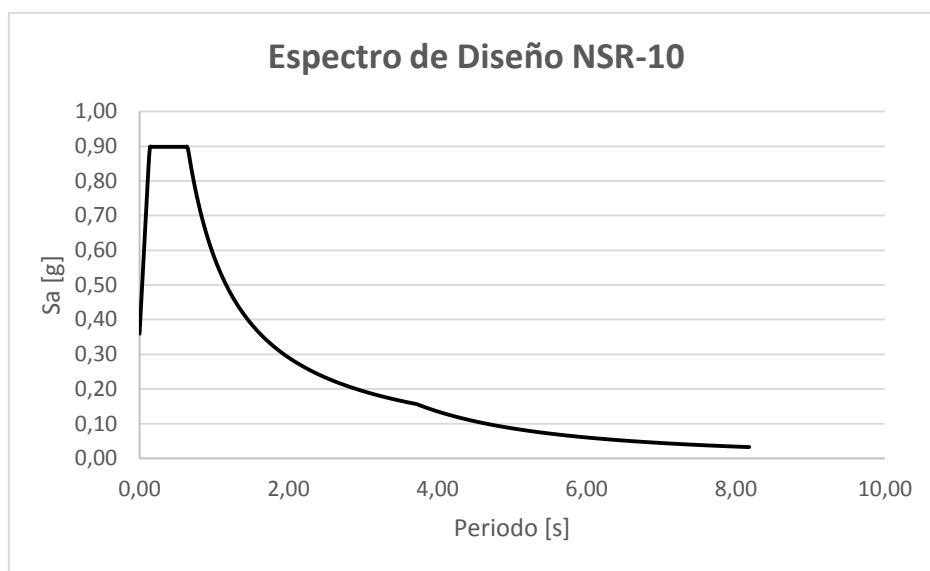


Figura 16. Espectro de diseño.

Tabla 6. Familia de acelerogramas para el área metropolitana de Bucaramanga

<u>FECHA</u>	<u>HORA</u>	<u>NOMBRE SISMO</u>	<u>Estación</u>
31/10/1935	18:37:49	Helena	Carr. Coll
15/09/1976	15:09:19	Firuli	Robic
27/05/1980	14:50:57	Mam. Lak.	Long Val D.
22/07/1983	2:39:54	Coalinga	Oil fie
1/10/1987	14:42:20	Whittier Narr.	Wilson
26/09/1997	9:40:30	Umbria-Marche	Nocera Umbra
15/04/1979	6:19:41	Montenegro	Herceg Nov
18/10/1989	0:04:02	Loma prieta	Gilroy 1.
25/04/1992	18:06:04	C. Mendocino	Butler Val 2.
12/11/1999	16:57:20	Duzce	Mud-Kaym Bn.

Los acelerogramas corregidos y correctamente escalados de acuerdo con NSR-10 A.2.7 deben cumplir con los siguientes requisitos:

1. Los espectros de respuesta de los acelerogramas empleados, apropiadamente escalados en consistencia con la amenaza, no pueden tener individualmente coordenadas espectrales para cualquier periodo de vibración en el rango comprendido entre $0.8T$ y $1.2T$, donde T ,

es el periodo fundamental de la estructura en la dirección de estudio, menores que el 80% de las coordenadas espectrales del movimiento esperado del terreno definidas en A.2.6.

2. El promedio de las ordenadas espectrales de todos los registros utilizados, en el rango comprendido entre $0.2T$ y $1.5T$ no debe ser menor que las ordenas espectrales en el mismo rango de periodos para el movimiento esperado el terreno definidos en A.2.6.

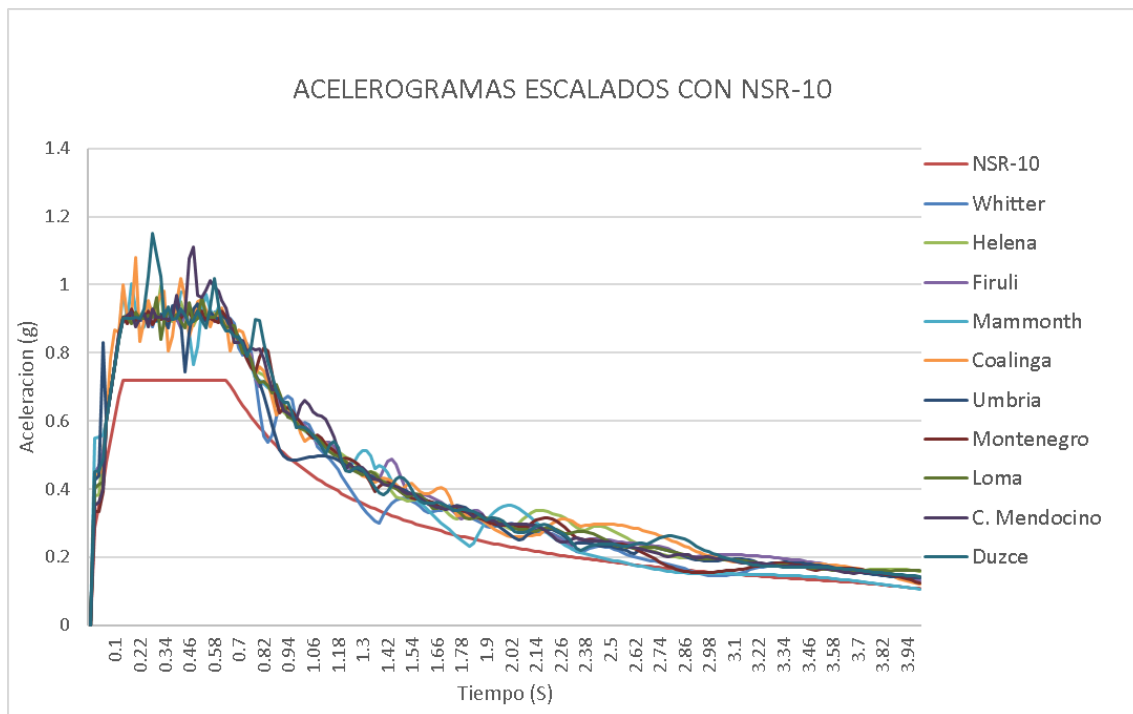


Figura 17. Verificación requisito 1 del A.2.7. del NSR-10

Se evidencia que cada uno de los acelerogramas corregidos y escalados es mayor que el espectro de diseño reducido al 80%.

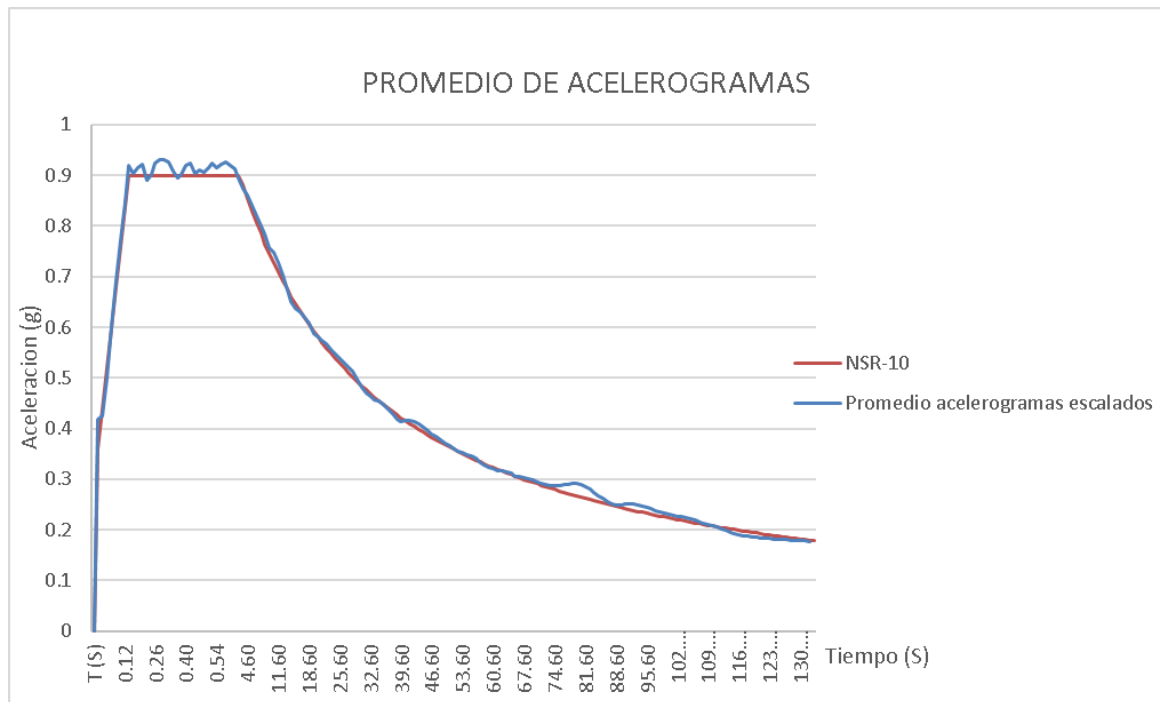


Figura 18. Verificación requisito 2 del A.2.7. del NSR-10

Se evidencia que el promedio de las ordenas de los espectros obtenidos de la corrección y escalamiento de los acelerogramas, no es mayor a las ordenadas del espectro de diseño establecido en el A.2.6 del NSR10 en los intervalos $0.2T$ y $1.5T$, Sin embargo la disposición de información y el acceso a registros sísmicos es escasa, considerando que la creación o selección de otros acelerogramas implica un estudio el cual es ajeno al objetivo del presente documento, se decide continuar con el uso de los registros presentados anteriormente.

En el modelamiento de la estructura y su análisis dinámico de acuerdo con el A.3.6.3 del NSR-10, se tiene en cuenta la ocurrencia simultanea de 100% de la fuerza sísmica en una dirección y 30% de la fuerza sísmica en la otra dirección.

Realizando el análisis dinámico por cada uno de los métodos empleados, se hace necesaria la corrección de los resultados de acuerdo con el A.5.5.3 del NSR-10, donde el máximo cortante en la base V_{tj} , no puede ser menor que el cortante sísmico, V_s , calculado por el método de la fuerza horizontal equivalente. Cuando el cortante en la base V_{tj} , obtenido para cualquiera de las direcciones principales, sea menor que el cortante sísmico en la base, V_s , todos los parámetros de la respuesta dinámica, deberán multiplicarse por el factor de modificación dado en la ecuación A.5.5-1 del NSR-10.

$$\frac{V_s}{V_{tj}} \quad (E.C. \text{ A. 5.5} - 1)$$

Ecuación 21

De igual manera para el análisis modal espectral de acuerdo con el A.5.4.5 del NSR-10, cuando el valor del cortante dinámico total de la base después de realizar la combinación modal, sea menor que el 80% para estructuras regulares y el 90% para estructuras irregulares, todos los parámetros de respuesta dinámica deberán ser multiplicados por los factores calculados segundo las ecuaciones A.5.4-4 y A.5.4-5 según corresponda

$$0.8 \frac{V_s}{V_{tj}} \quad E.C. \text{ A. 5.4} - 4$$

Ecuación 22

$$0.9 \frac{V_s}{V_{tj}} \quad E.C. \text{ A. 5.4} - 4$$

Ecuación 23

Modelado de estructura con aisladores. El diseño de los aisladores es realizado a partir de los resultados obtenidos del modelo de base fija elaborado en el Software SAP2000 V.20,

partiendo de la fuerza axial máxima en las columnas donde se dispondrán los aisladores, este valor se determina de la combinación de carga de 1.2D+1.0E.

Tabla 7. *Peso de la estructura y máxima reacción en los apoyos*

W (KN)	P max (KN)
4994.66	544

6.3 Modelado de la estructura con aisladores LRB

Se utilizaron 14 aisladores LRB, ubicados en cada una de las columnas de la estructura y se tomó como valor de carga axial, el valor correspondiente al máximo de todas las columnas.

- Periodo fundamental de la estructura sin aislamiento = 0.28857 Seg
- Periodo objetivo de la estructura aislada = 2.28857 Seg
- Peso de la estructura = 4994 KN

De la fórmula de 17.5-2. Del ASCE 7-16 se calculó la rigidez horizontal necesaria para el sistema de aislamiento.

$$Kh \text{ sistema de aislamiento} = 3.837645 \frac{KN}{mm}$$

$$\frac{Kh}{\# \text{ Aislador}} = 0.27411 \frac{KN}{mm}$$

El procedimiento establecer las propiedades mecánicas de aislador, es abreviado empleando el catálogo de fabricantes de este tipo de aisladores, en este ejemplo, procedemos a utilizar el catálogo

Aisladores elastoméricos de caucho y plomo LRB, de la empresa FIP INDUSTRIALE LEADING TECHNOLOGIES.

Se realizará la implementación de dos tipos de aisladores obtenidos del manual mencionado.

Tabla 8. Especificaciones aislador LBR-S500/150-110

AISLADOR LRB-S 500/150-110							
V	Fzd	Ke	ξ_e	F2	F1	d1	Kv
KN	KN	KN/mm	%	KN	KN	mm	KN/mm
540	2420	0.9	27	224	106	12	776

Tabla 9. Especificaciones aislador LBR-S750/154-160

AISLADOR LRB-S 750/154-160							
V	Fzd	Ke	ξ_e	F2	F1	d1	Kv
KN	KN	KN/mm	%	KN	KN	mm	KN/mm
3750	9200	1.94	26	485	225	12	1926

6.4 Modelado de la estructura con aisladores HDRB

Espectro de diseño para análisis modal espectral de estructura con base aislada

El espectro de diseño construido de acuerdo con el A.2.6. del NSR-10 es modificado en función de la incidencia del amortiguamiento de acuerdo con la norma ASCE 7-10 (Lopez, C. F.2016).

La selección del aislador LRB, se realizara con respecto a la columna con mayores solicitaciones obtenidas del modelo elaborado en el software SAP2000.

$$\frac{1}{B} = 0.25 * (1 - \ln \xi)$$

Ecuación 24

Donde:

B= Factor de reducción del espectro de diseño

ε = Factor de amortiguamiento

El amortiguamiento de los aisladores empleados en la estructura de base aislada es del 26% según los catálogos empleados.

6.5 Criterio de modificación del espectro de diseño

$$\frac{1}{B} = 0.25 * (1 - \ln 0.26) = 0.5867$$

Ecuación 25

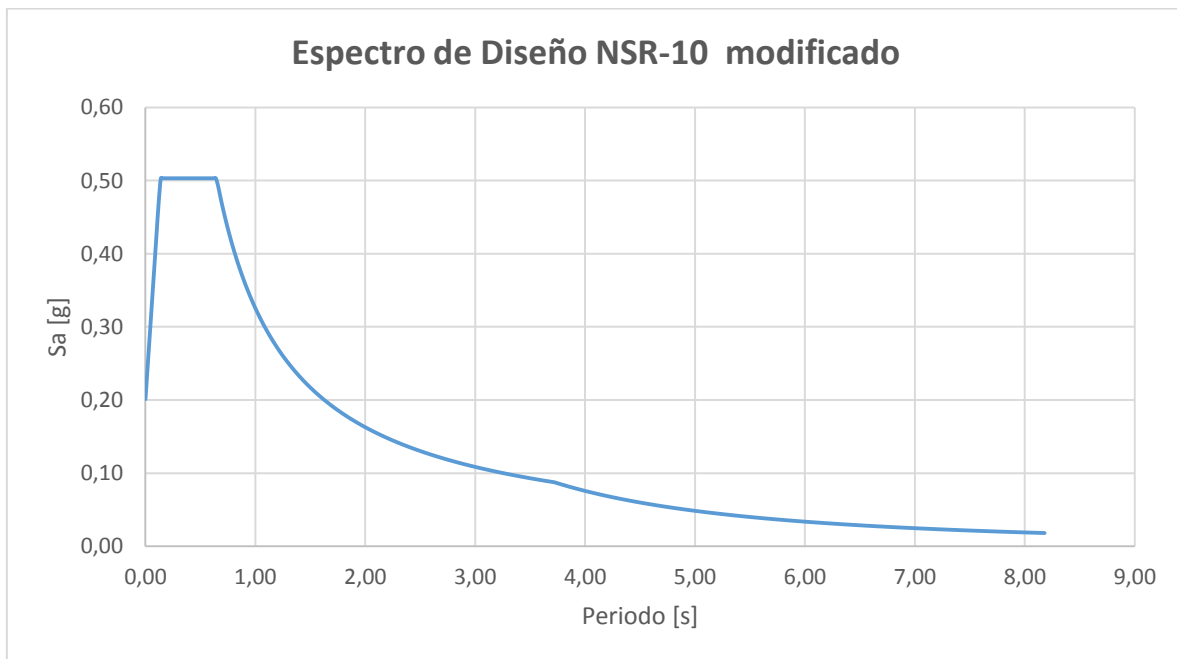


Figura 19. Espectro de diseño NSR-10 modificado

6.6 Resultados

Periodo de las estructuras

Se obtuvieron los periodos de la estructura con base fija, y con la implementación de cada uno de los aisladores mencionados anteriormente, mediante un análisis modal realizado en Software SAP2000 V.20.

Tabla 10. Periodo de vibración para base fija y base aislada

MODO DE VIBRACION	PERIODOS PARA MODOS DE VIBRACION PARA ESTRUCTURA							
	BASE FIJA		LBR-S 500/150-110		LBR-S 750/154-160		HDR H 30 cm	
	T (s)	% masa	T (s)	% masa	T (s)	% masa	T (s)	% masa
1	0.288579	83.5820%	1.199725	80.60%	0.849084	77.10%	2.22831	74.566%
2	0.265357	85.4620%	1.142315	81.91%	0.820531	80.78%	2.148474	79.062%
3	0.227229	90.0080%	1.009735	99.77%	0.724233	99.53%	1.913825	99.988%
4	0.126629	90.0080%	0.159013	99.77%	0.165794	99.53%	0.192659	99.988%
5	0.112785	90.0180%	0.144968	99.95%	0.154	99.94%	0.167285	99.998%
6	0.109694	90.0180%	0.135816	99.95%	0.137959	99.97%	0.155223	99.998%
7	0.103854	90.0221%	0.132507	99.97%	0.126958	99.97%	0.127905	99.998%
8	0.102239	90.0246%	0.12067	99.97%	0.112903	99.97%	0.118732	99.998%
9	0.101094	90.0446%	0.110644	99.97%	0.106759	99.97%	0.113785	99.998%
10	0.100282	90.0626%	0.109384	99.97%	0.104104	99.97%	0.112664	99.998%
11	0.096376	90.0629%	0.106579	99.97%	0.102692	99.97%	0.111042	99.998%
12	0.095628	90.0631%	0.104241	99.97%	0.101618	99.97%	0.107997	99.998%
13	0.094546	90.0643%	0.102627	99.97%	0.100288	99.97%	0.105286	99.998%
14	0.092411	90.0773%	0.101837	99.97%	0.097558	99.97%	0.104599	99.998%
15	0.086871	99.5773%	0.098553	99.97%	0.096698	99.97%	0.101656	99.998%
16	0.086602	99.5774%	0.097868	99.97%	0.095149	99.97%	0.100651	99.998%
17	0.082174	99.6424%	0.096259	99.97%	0.095041	99.97%	0.098751	99.998%
18	0.076419	99.6614%	0.09493	99.97%	0.091214	99.97%	0.096178	99.998%
19	0.072831	99.6618%	0.090864	99.97%	0.087284	99.97%	0.092414	99.998%
20	0.071813	99.6668%	0.090409	99.97%	0.08339	99.97%	0.08805	99.998%

Tabla 11. Periodo y porcentaje de participación del modo de vibración de la estructura.

PERIODOS DE VIBRACION PARA MODOS FUNDAMENTALES DE LA ESTRUCTURA							
BASE FIJA		LBR-S 500/150-110		LBR-S 750/154-160		HDR H 30 cm	
Periodo (s)	% de masa	Periodo (s)	% de masa	Periodo (s)	% de masa	Periodo (s)	% de masa
0.289	83.582	1.200	80.603	0.849	77.098	2.228	74.566

Cortante Basal

Se obtiene del Software SAP2000 V.20 los resultados del cortante basal en las direcciones X y Y, para los modelos de base fija y aislada a través de análisis cronológico y modal espectral. En el caso del registro cronológico en la Tabla 11. se presentan los valores máximos, mientras en la figura 19. se presentan los resultados en función del tiempo.

Tabla 12. Cortante basal de la estructura con base fija y con la base aislada

CORTANTE BASAL ESTRUCTURA BASE FIJA CORREGIDO		
ANALISIS	CORTANTE	
	KN	
	(X)	(Y)
FHE	2979.239	2979.239
MODAL ESPECTRAL	2729.123	2681.322
ANALISIS CRONOLOGICO	2979.24	2995.146

CORTANTE BASAL ESTRUCTURA AISLADA LBR S 500/150-110		
ANALISIS	CORTANTE	
	KN	
	(X)	(Y)
MODAL ESPECTRAL	1055.307	1209.832
ANALISIS CRONOLOGICO	1027.136	715.198

CORTANTE BASAL ESTRUCTURA AISLADA HDRB H 30 CM		
ANALISIS	CORTANTE	
	KN	
	(X)	(Y)
MODAL ESPECTRAL	567.453	666.125
ANALISIS CRONOLOGICO	460.139	344.873

CORTANTE BASAL ESTRUCTURA AISLADA LBR S 750/154-160		
ANALISIS	CORTANTE	
	KN	
	(X)	(Y)
MODAL ESPECTRAL	1522.68	1743.033
ANALISIS CRONOLOGICO	2967.224	2260.469

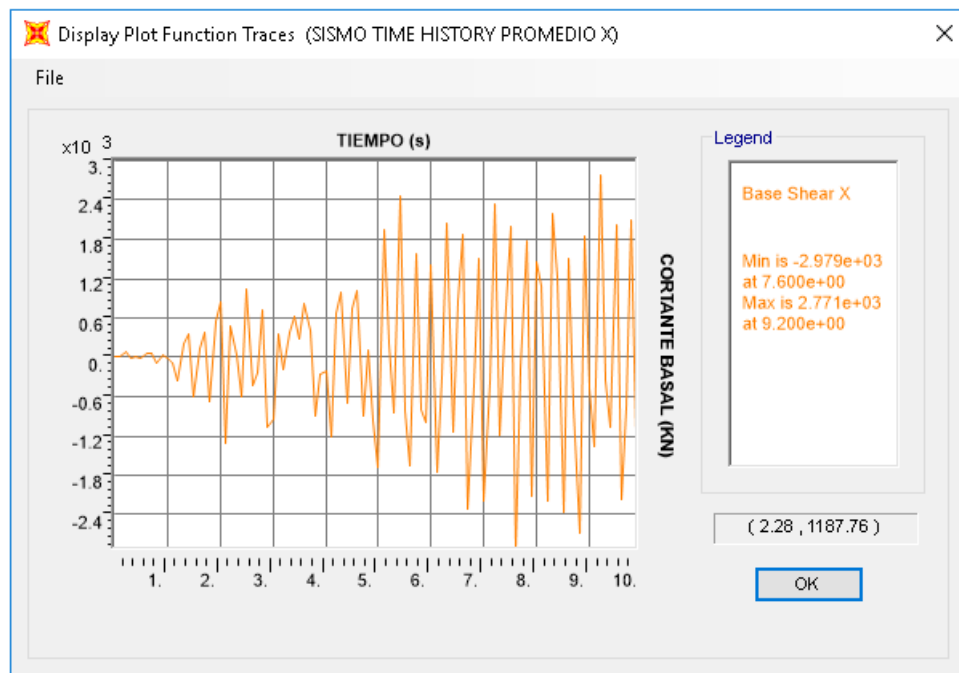


Figura 20. Cortante basal estructura base fija (kN vs s)

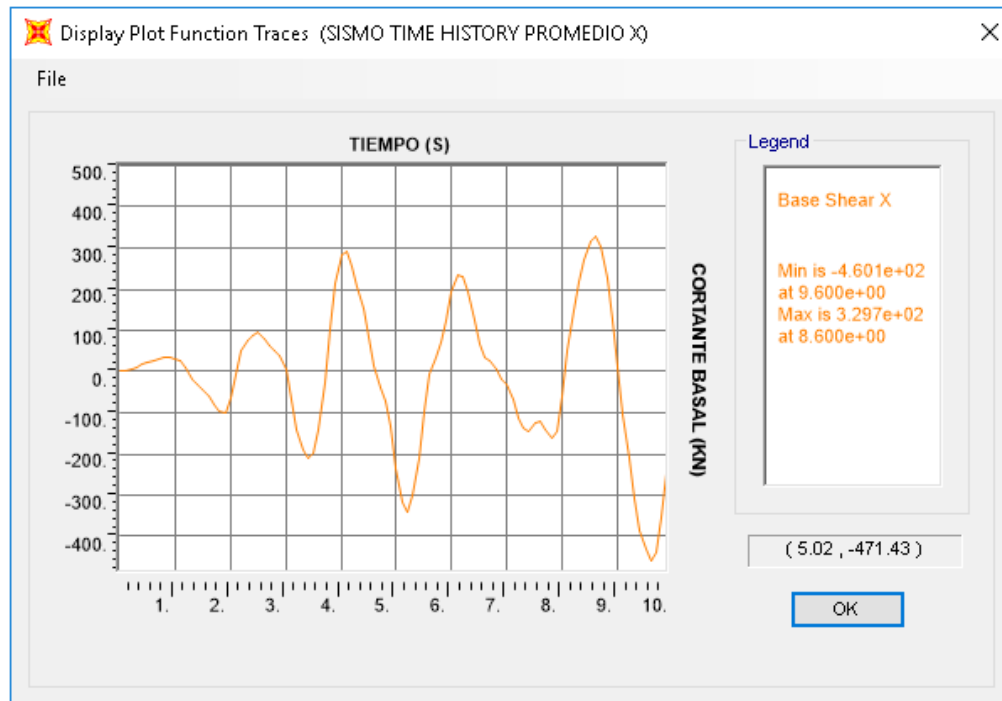


Figura 21. Cortante basal estructura aislada HDRB H = 30 cm (kN vs s)

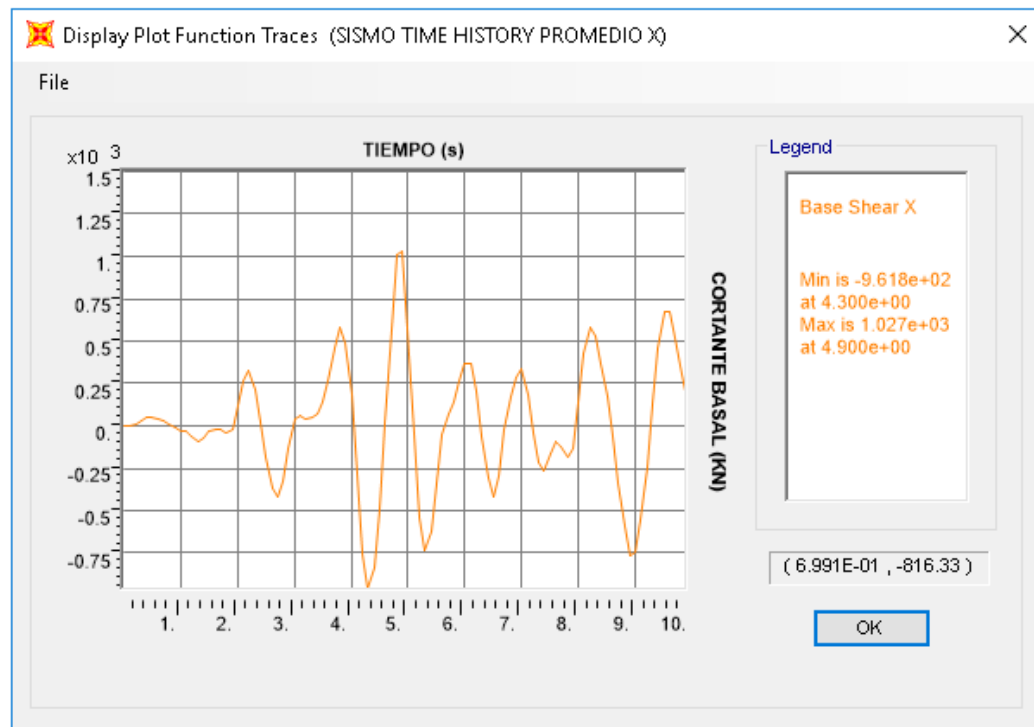


Figura 22. Cortante basal estructura aislada (LBR S500/150-110) (kN vs s)

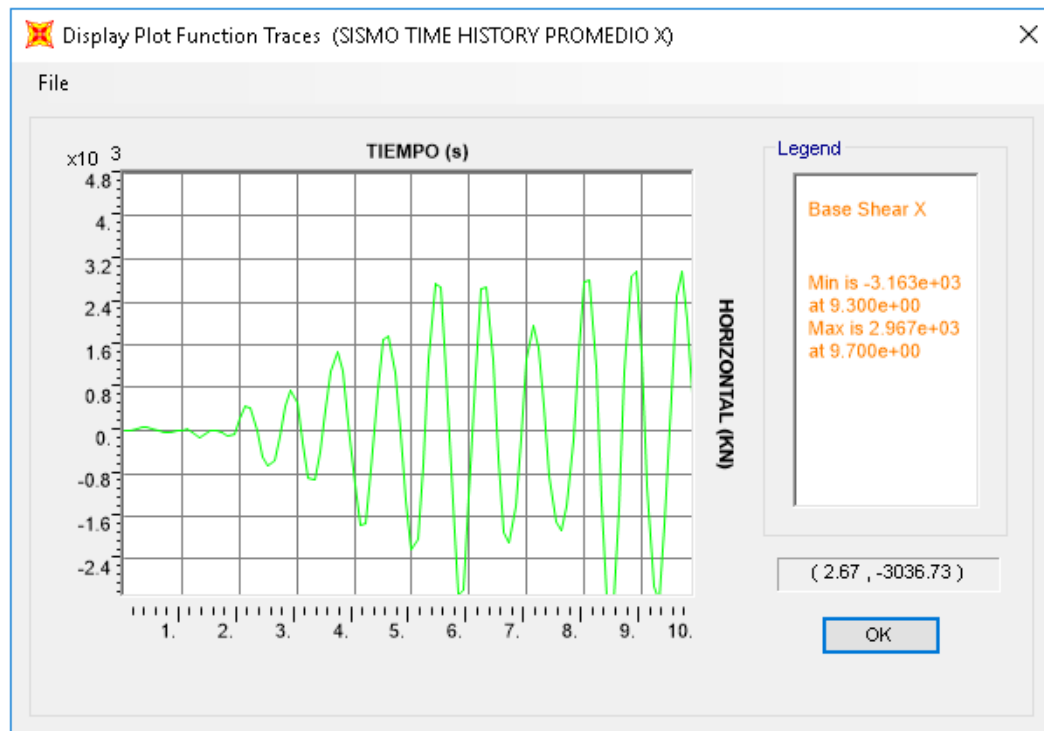


Figura 23. Cortante basal estructura aislada (LBR S750/154-160) (kN vs s)

Desplazamientos y Derivas

Los desplazamientos de la estructura son obtenidos del Software SAP2000 V.20, para el caso de los análisis cronológicos, se identificó el instante en el cual el último piso tiene los mayores desplazamientos, y ese mismo instante se calcularon los desplazamientos de los demás niveles.

Tabla 13. Desplazamientos de la estructura con base fija y con la base aislada

DESPLAZAMIENTOS DE LA ESTRUCTURA BASE FIJA				
PISO	TIPO DE ANALISIS			
	MODAL ESPECTRAL DIRECCION X (mm)	MODAL ESPECTRAL DIRECCION Y (mm)	ANALISIS CRONOLOGICO LINEAL DIRECCION X (mm)	ANALISIS CRONOLOGICO LINEAL DIRECCION Y (mm)
0	0	0	0	0
3.5	11.753	9.065	10.49	10.4
7	24.8704	20.875	24.8	24.12

DESPLAZAMIENTOS DE LA ESTRUCTURA BASE AISLADA CON AISLADOR LRB-S 750/154 -160				
PISO	TIPO DE ANALISIS			
	MODAL ESPECTRAL DIRECCION X (mm)	MODAL ESPECTRAL DIRECCION Y (mm)	ANALISIS CRONOLOGICO LINEAL DIRECCION X (mm)	ANALISIS CRONOLOGICO LINEAL DIRECCION Y (mm)
0	65.5758	62.429	148.7	65.19
3.5	74.009	70.576	165.7	74.13
7	79.979	76.97	179.8	81.59

DESPLAZAMIENTOS DE LA ESTRUCTURA BASE AISLADA CON AISLADOR LRB-S 750/154 -160				
PISO	TIPO DE ANALISIS			
	MODAL ESPECTRAL DIRECCION X (mm)	MODAL ESPECTRAL DIRECCION Y (mm)	ANALISIS CRONOLOGICO LINEAL DIRECCION X (mm)	ANALISIS CRONOLOGICO LINEAL DIRECCION Y (mm)
0	186.99	184.91	100.95	122.74
3.5	190.14	188.42	102.62	125.67
7	192.429	191.184	105.7	127

DESPLAZAMIENTOS DE LA ESTRUCTURA BASE AISLADA CON AISLADOR LRB-S 500/150-110				
PISO	TIPO DE ANALISIS			
	MODAL ESPECTRAL DIRECCION X (mm)	MODAL ESPECTRAL DIRECCION Y (mm)	ANALISIS CRONOLOGICO	ANALISIS CRONOLOGICO
			LINEAL DIRECCION X (mm)	LINEAL DIRECCION Y (mm)
0	97.0408	93.08	86.47	44.11
3.5	102.8003	98.781	91.86	46.98
7	106.876	103.2318	95.66	49.32

El análisis de la estructura con base fija, permite evidenciar un cumplimiento de derivas siendo estas menores al 1% de la altura del entrepiso, de igual manera considerando el tipo de uso de la edificación y teniendo presente la existencia de espacios con contenido delicado y en procura de garantizar que no existan daños en elementos no estructurales durante la ocurrencia de un evento sísmico se implementarán aisladores sísmicos, los cuales al generan una reducción en el cortante basal, que permitirían una optimización de la estructura en términos de secciones de los elementos.

Tabla 14. Derivas de la estructura con base fija y con la base aislada

DERIVAS DE LA ESTRUCTURA BASE FIJA					
PISO	TIPO DE ANALISIS				
	MODAL ESPECTRAL	MODAL ESPECTRAL	ANALISIS	ANALISIS	
	DIRECCION X	DIRECCION Y	CRONOLOGICO LINEAL DIRECCION X	CRONOLOGICO LINEAL DIRECCION Y	
0	0	0	0	0	0
3.5	0.34%	0.26%	0.30%	0.30%	
7	0.37%	0.34%	0.41%	0.39%	
DERIVAS DE LA ESTRUCTURA BASE AISLADA CON AISLADOR LRB-S 500/150-110					
PISO	TIPO DE ANALISIS				
	MODAL ESPECTRAL	MODAL ESPECTRAL	ANALISIS	ANALISIS	
	DIRECCION X	DIRECCION Y	CRONOLOGICO LINEAL DIRECCION X	CRONOLOGICO LINEAL DIRECCION Y	
0	0	0	0	0	0
3.5	0.16%	0.16%	0.15%	0.08%	
7	0.12%	0.13%	0.11%	0.07%	
DERIVAS DE LA ESTRUCTURA BASE AISLADA CON AISLADOR LRB-S 750/154 -160					
PISO	TIPO DE ANALISIS				
	MODAL ESPECTRAL	MODAL ESPECTRAL	ANALISIS	ANALISIS	
	DIRECCION X	DIRECCION Y	CRONOLOGICO LINEAL DIRECCION X	CRONOLOGICO LINEAL DIRECCION Y	
0	0	0	0	0	0
3.5	0.24%	0.23%	0.49%	0.26%	
7	0.17%	0.18%	0.40%	0.21%	
DERIVAS DE LA ESTRUCTURA BASE AISLADA CON AISLADOR HDRB H=30 CM					
PISO	TIPO DE ANALISIS				
	MODAL ESPECTRAL	MODAL ESPECTRAL	ANALISIS	ANALISIS	
	DIRECCION X	DIRECCION Y	CRONOLOGICO LINEAL DIRECCION X	CRONOLOGICO LINEAL DIRECCION Y	
0	0	0	0	0	0
3.5	0.09%	0.10%	0.05%	0.08%	
7	0.07%	0.08%	0.09%	0.04%	

6.7 Comparación de los resultados

Se comparan los resultados obtenidos para la estructura con cada uno de los sistemas de aislamiento empleados, comparando los periodos relacionados en la tabla 11 y la aceleración S_a , asociada para cada uno de los sistemas de aislamiento, la fuerza cortante generada por la acción sísmica, y los desplazamientos y derivas de la estructura. Simultáneamente se realiza una comparación entre los resultados obtenidos del análisis modal espectral y el análisis cronológico lineal realizado. Como se indica en las tablas 15 y 16 y figuras 24 a 41.

Periodo de la estructura

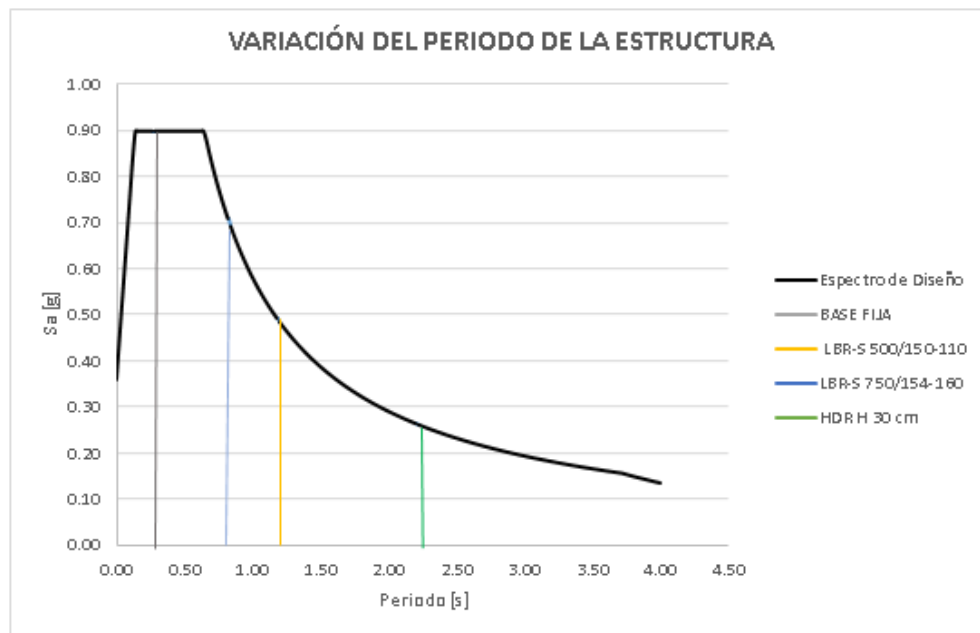


Figura 24. Espectro de diseño NSR-10 modificado

Tabla 15. Incremento del periodo fundamental de la estructura

INCREMENTO DEL PERIODO FUNDAMENTAL			
MODO DE VIBRACION	LBR-S 500/150-110	LBR-S 750/154-160	HDR H 30 cm
1	416%	294%	772%

Cortante basal

Tabla 16. Disminución del cortante basal

DISMINUCION DEL CORTANTE BASAL						
ANALISIS EMPLEADO	LRB S-500/150-110		LRB-S 750/154-160		HDRB H=30 cm	
	(X)	(Y)	(X)	(Y)	(X)	(Y)
MODAL ESPECTRAN	61%	55%	44%	35%	79%	75%
ANALISIS CRONOLOGICO	66%	76%	0%	25%	79%	75%

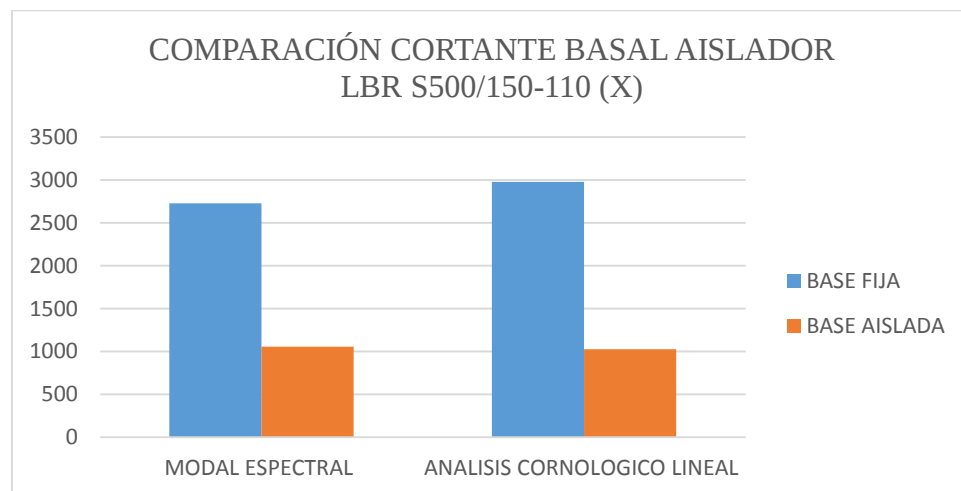


Figura 25. Comparación cortante basal base fija y base asilada (LRB S500/150-110)

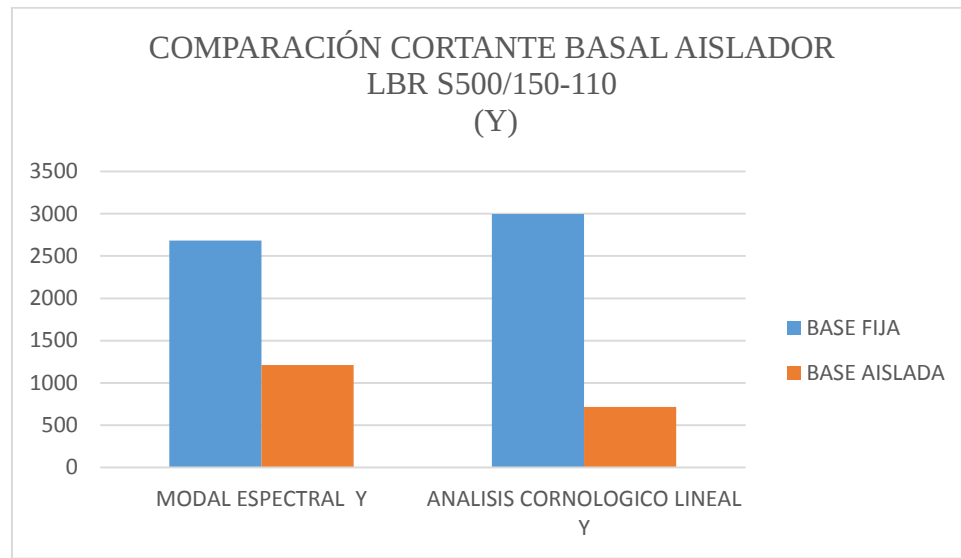


Figura 26. Comparación cortante basal base fija y base aislada (LRB S500/150-110)

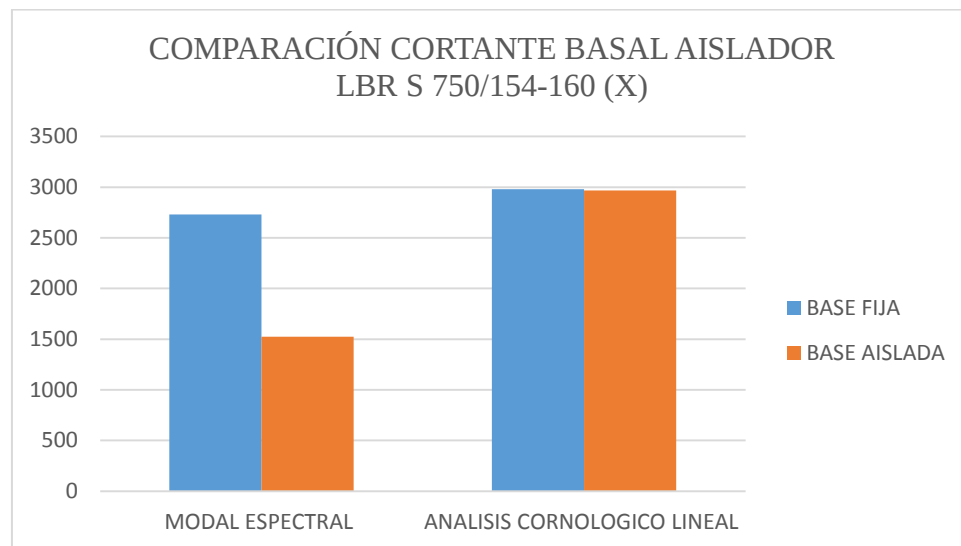


Figura 27. Comparación cortante basal base fija y base aislada (LRB S750/154-160)

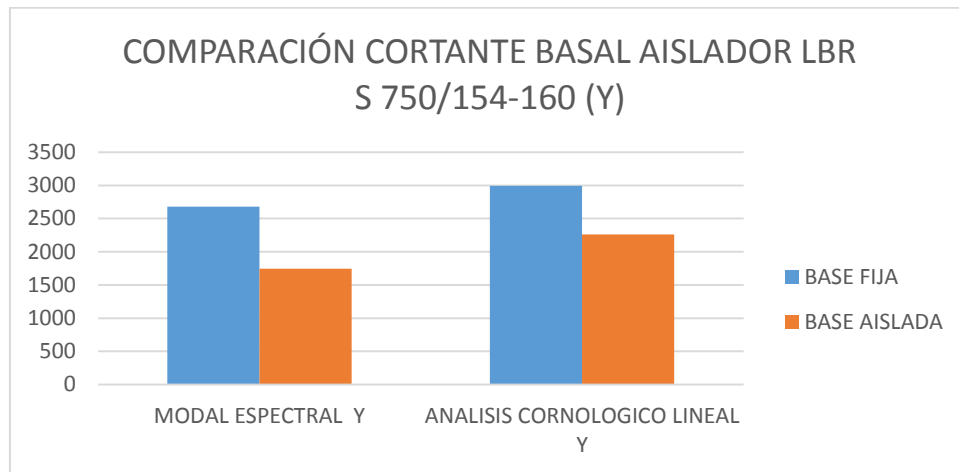


Figura 28. Comparación cortante basal base fija y base aislada (LRB S750/154-160)

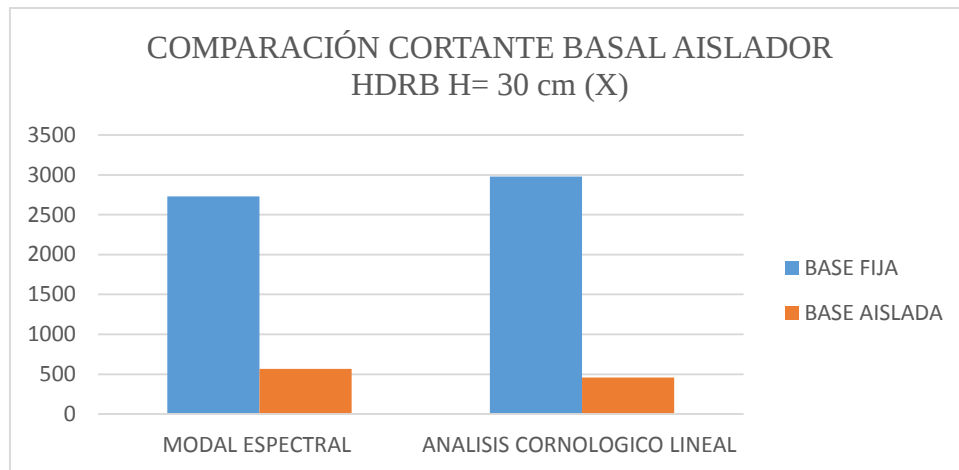


Figura 29. Comparación cortante basal base fija y base aislada (HDRB H=30)

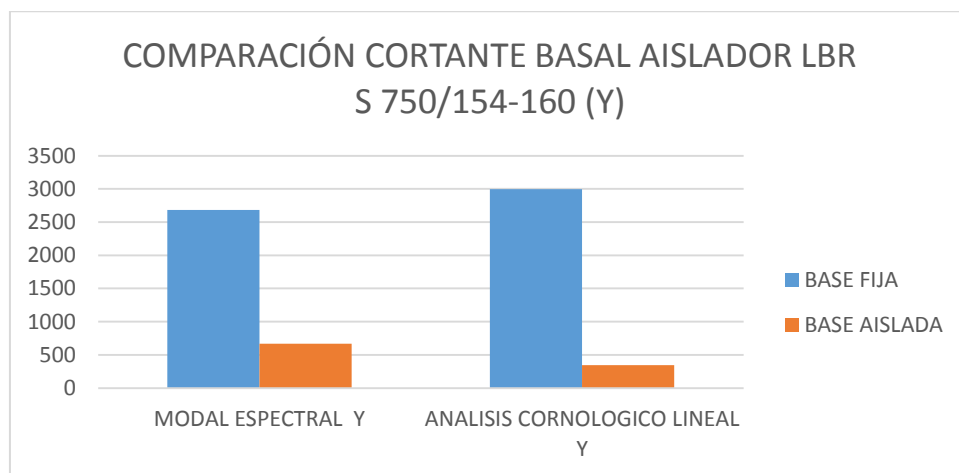


Figura 30. Comparación cortante basal base fija y base aislada (HDRB H =30 CM)

Desplazamientos

De las figuras 30 a la 35, se presenta los resultados obtenidos de la comparación entre la estructura con base fija y aislada.

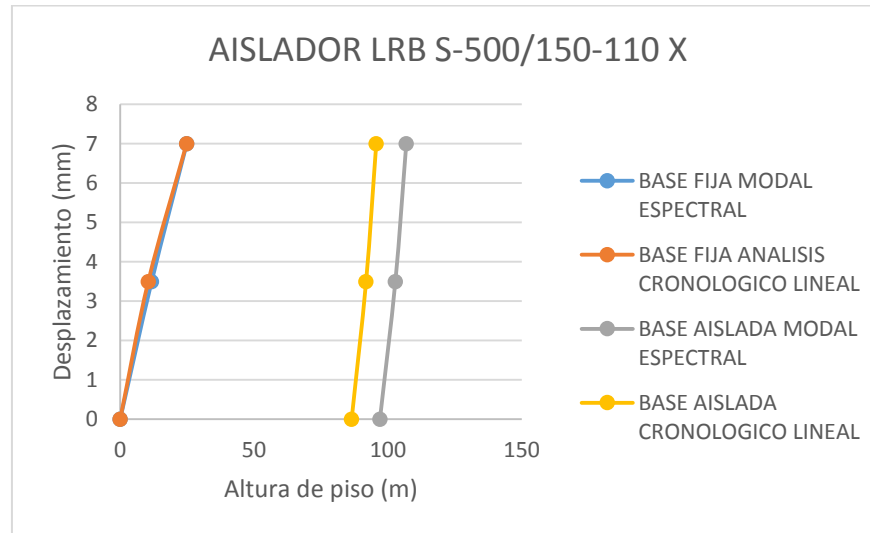


Figura 31. Comparación desplazamientos (LRB S-500/150-110)

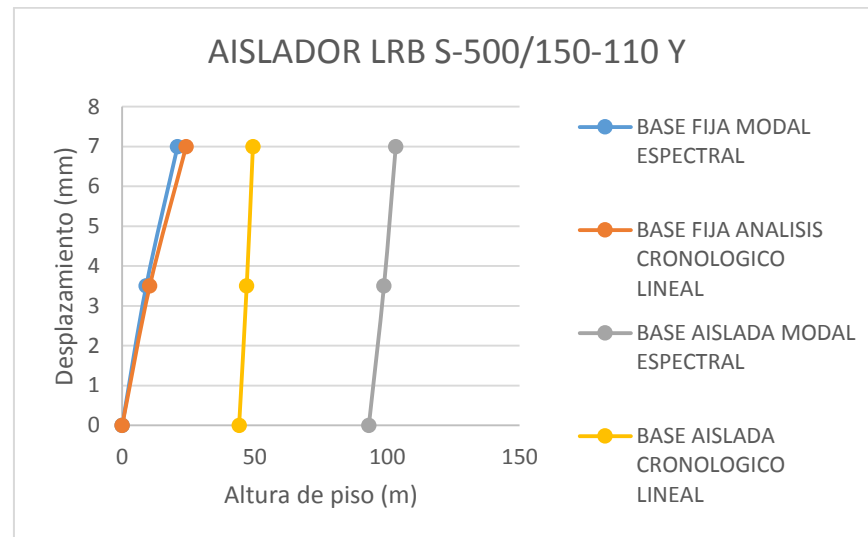


Figura 32. Comparación desplazamientos (LRB S-500/150-110)

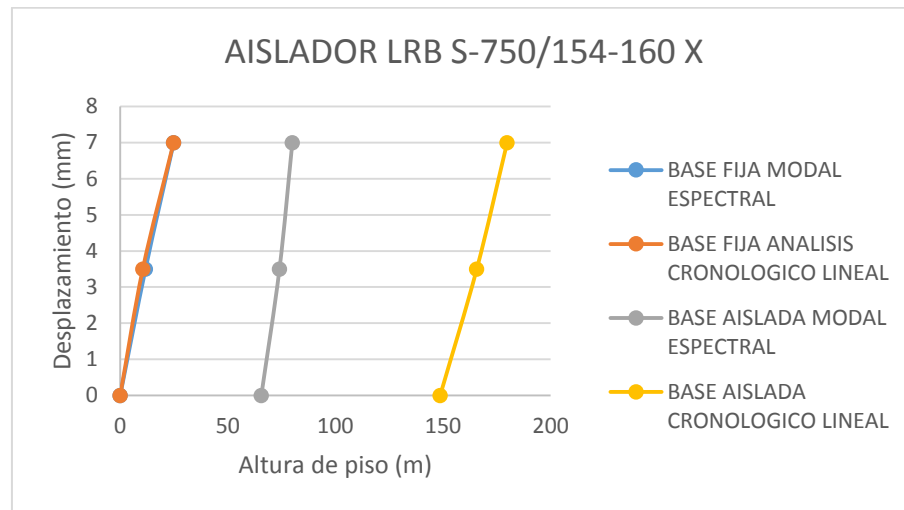


Figura 33. Comparación desplazamientos (LRB S-750/154-160)

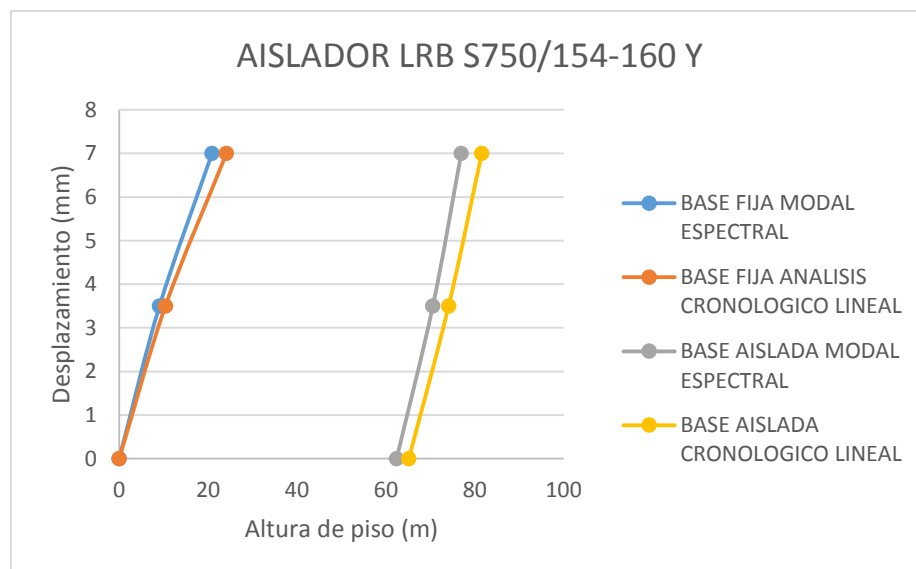


Figura 34. Comparación desplazamientos (LRB S-750/154-160)

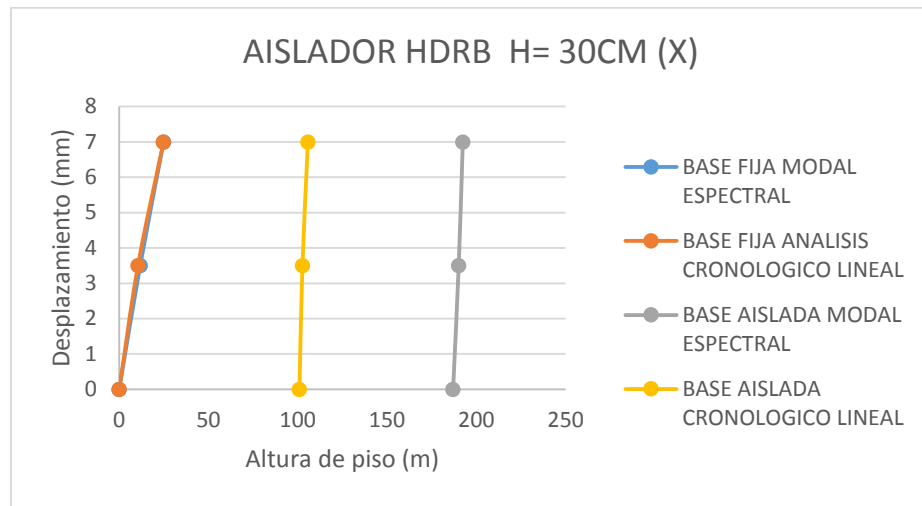


Figura 35. Comparación desplazamientos (HDRB H=30 cm)

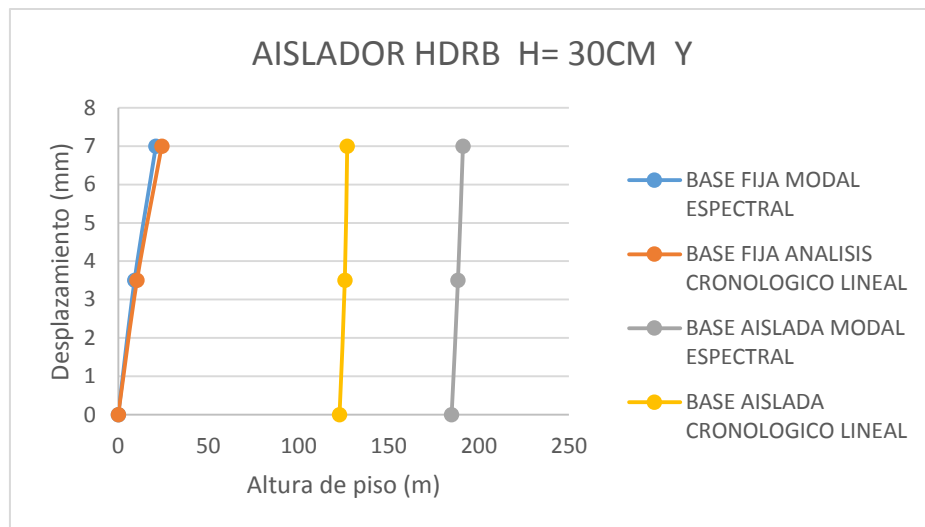


Figura 36. Comparación desplazamientos (HDRB H=30 cm)

Derivas

De las figuras 36 a la 41, se presenta los resultados obtenidos de derivas para la comparación entre la estructura con base fija y aislada.

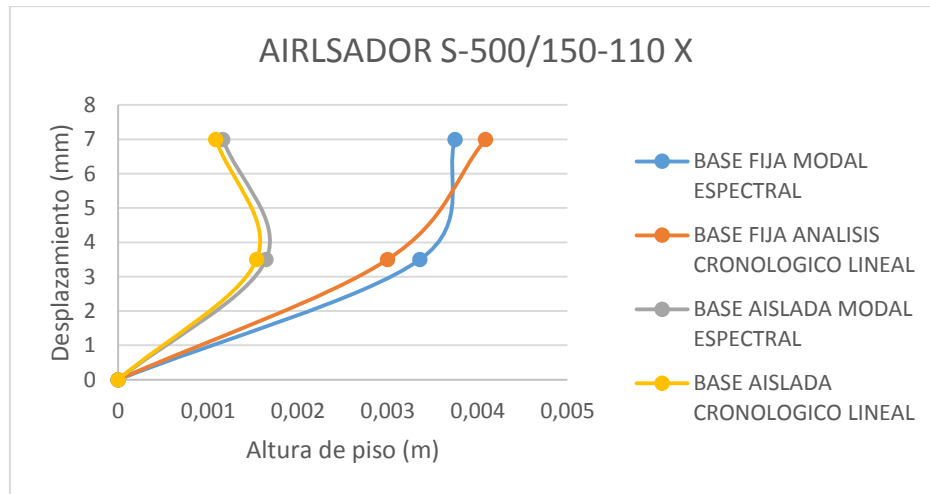


Figura 37. Comparación desplazamientos (LRB S-500/150-110)

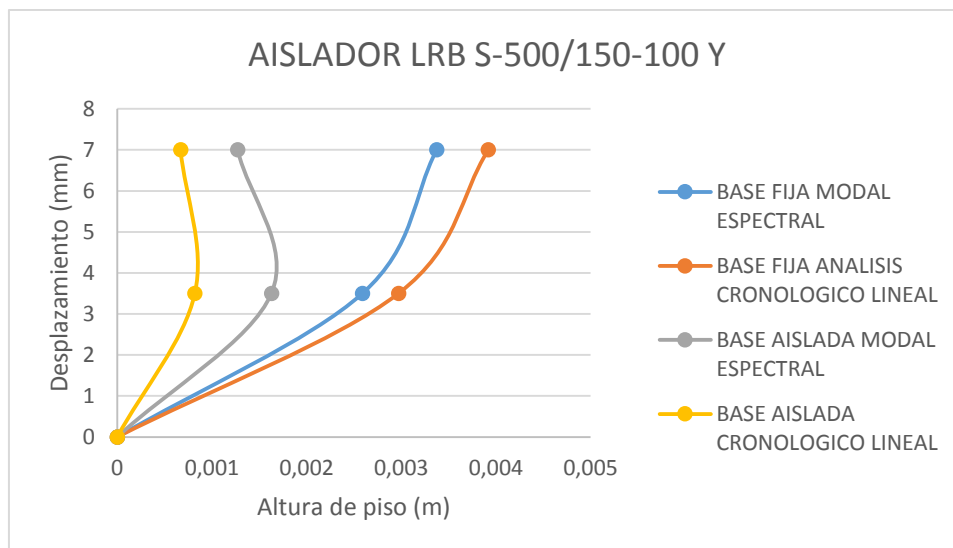


Figura 38. Comparación desplazamientos (LRB S-500/150-110)

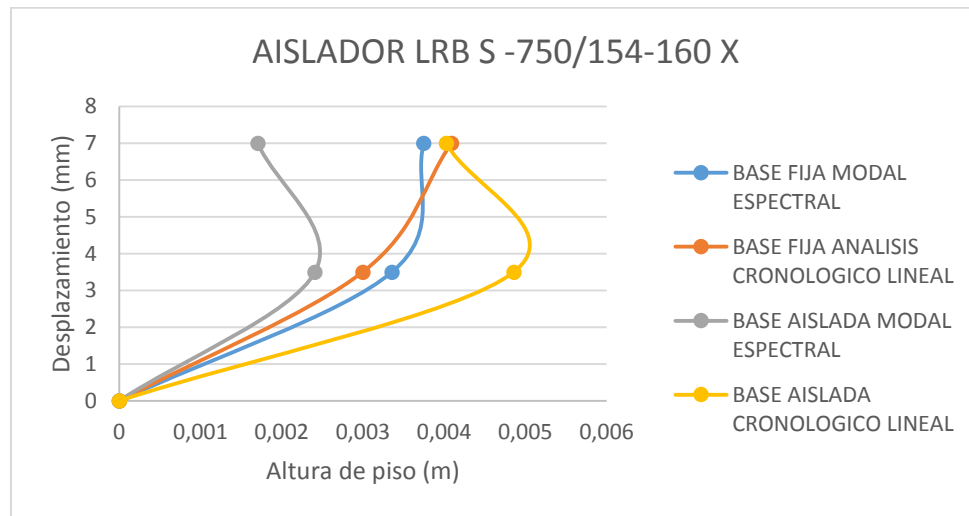


Figura 39. Comparación desplazamientos (LRB S-750/154-160)

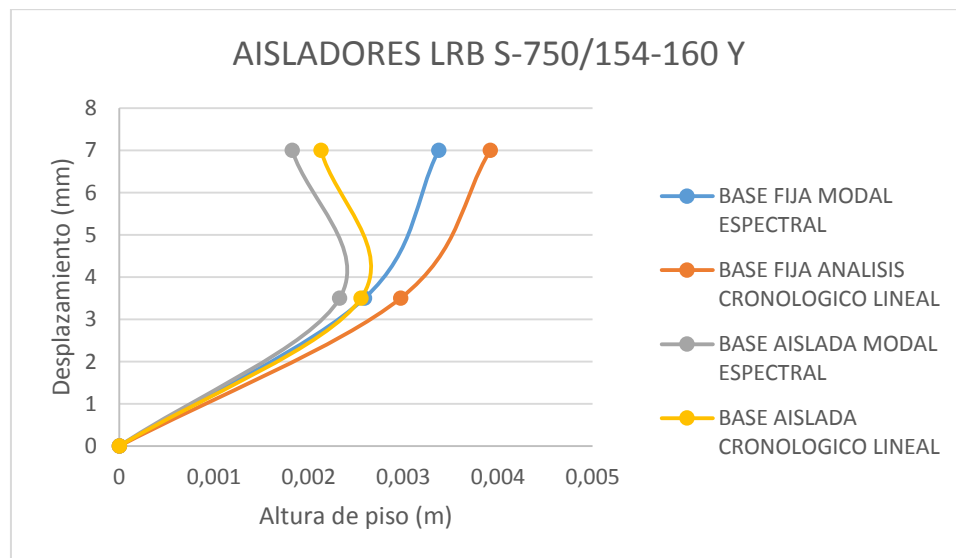


Figura 40. Comparación desplazamientos (LRB S-750/154-160)

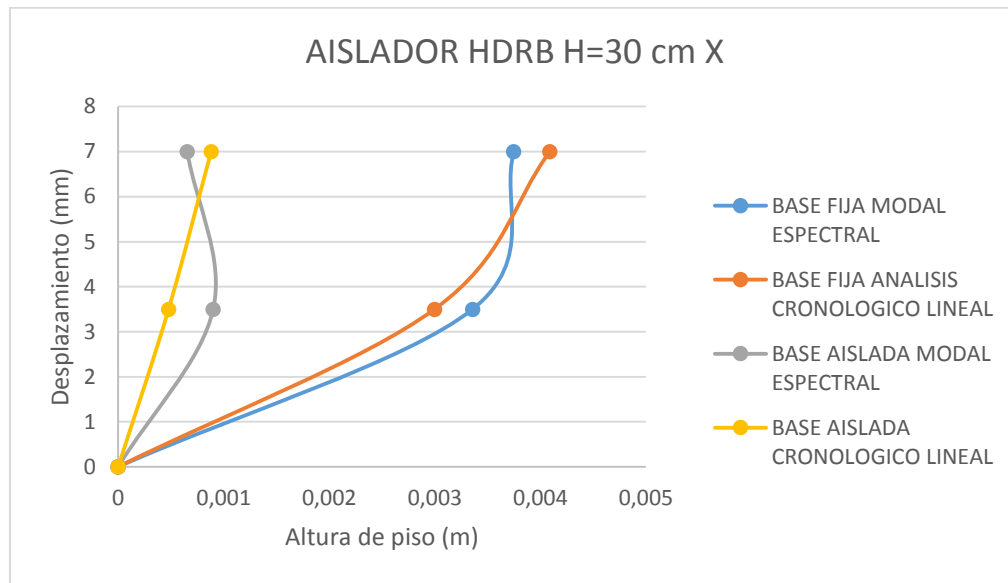


Figura 41. Comparación desplazamientos (HDRB H=30 cm)

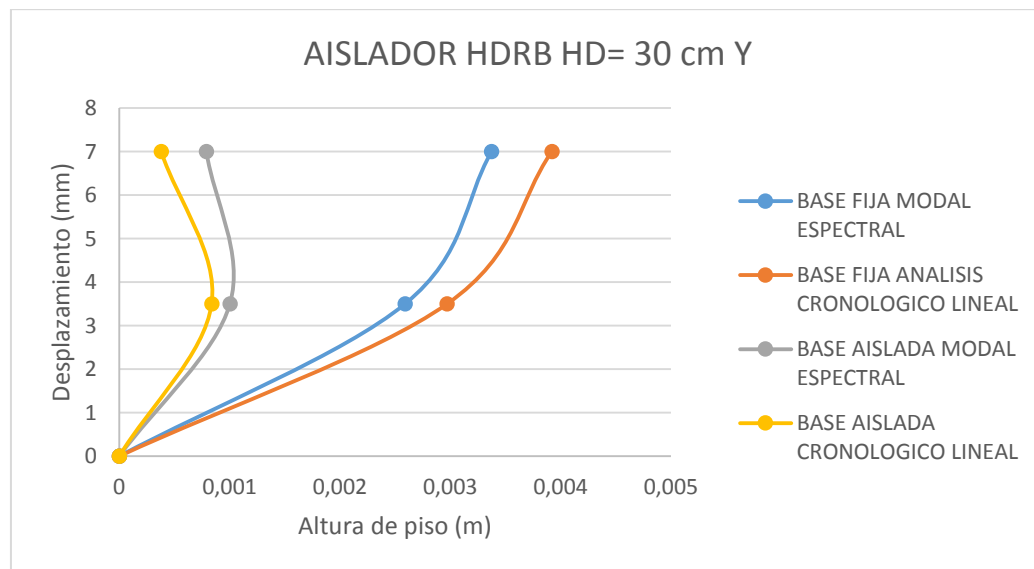


Figura 42. Comparación desplazamientos (HDRB H=30 cm)

7. Conclusiones

Con la finalidad de realizar una evaluación de las estructuras aisladas sísmicamente con el empleo de dispositivos LRB y HRB, este documento compara el comportamiento de una estructura convencional de base fija con el de una estructura con estos dispositivos de protección sísmica. Se realiza para este fin el análisis de una institución educativa en una zona de amenaza sísmica alta y la determinación de las propiedades mecánicas de los aisladores elastoméricos (HDRB) y aisladores elastoméricos con núcleo de plomo (LRB), empleando un análisis modal espectral y un análisis cronológico lineal.

Los resultados obtenidos permiten evidenciar en primer lugar un incremento del periodo fundamental de la estructura para cada uno de los dispositivos de aislamiento diseñados, reduciendo así, la aceleración espectral correspondiente en el espectro de diseño. Se encontró una reducción significativa en el cortante y en las derivas de la estructura. El aislamiento de la estructura concentra la disipación de energía en los dispositivos empleados, mostrando mayores desplazamientos en las estructuras aisladas, concentrados en el nivel del sistema de aislamiento.

Se evidencia una mejor respuesta en el dispositivo de aislamiento HDRB, debido a que los parámetros comerciales de los LRB, no permiten la selección de un dispositivo que se ajuste de manera cercana a los parámetros requeridos por el procedimiento para la obtención de las propiedades mecánicas realizado, de igual manera los resultados permiten observar como el emplear un dispositivo con rigidez efectiva bastante mayor a la solicitada, no genera grandes beneficios en la reducción de cortantes y derivas.

Los resultados obtenidos de los modelos dinámicos empleados en el análisis de la estructura discrepan entre sí, sin embargo, ambos reflejan las bondades de los aisladores.

Se realizó la implementación de la metodología de la normativa ASCE/SEI 7-16 para el diseño de aisladores elastoméricos, los cuales posteriormente se modelaron en el Software SAP2000 V.20, generando aumento de desplazamientos y reducción de derivas y cortantes para cada uno de los sistemas de aislamiento empleados.

Se realizó la comparación de los aisladores de tipo LRB y HDRB, obteniendo mejores resultados en términos de reducción de derivas y cortantes con el empleo de aisladores tipo HDRB, considerando que la metodología de selección de los aisladores tipo LRB se basó en los catálogos comerciales y las características requeridas no fueron satisfechas con exactitud.

Se realizó comparación entre los análisis dinámicos, modal espectral y cronológico lineal, los cuales, comparados bajo el criterio de máximos y mínimos para el caso del análisis cronológico lineal, representan la variación del comportamiento de la estructura con base fija y posteriormente con base asilada.

Referencias Bibliográficas

- AIS. (Marzo de 2010). Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, Norma Colombiana de diseño construcción sismo resistente NSR-10. Bogotá.
- Almazán, J. (2012). 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, 7(2-3), pp. 4-28,.
- Arévalo, C.M. y López A. F., (Octubre - Diciembre, 2018). Propuesta para la futura norma de aislamiento sísmico de edificaciones en Colombia. DYNA, 85(207), pp. 306-315
- ARRIAGADA, J. A. (2005) Aislación Sísmica de un Edificio de Oficinas de Siete Pisos . (Análisis Comparativo de Comportamiento y Costos con un Edificio Tradicional). Valdivia, Chile. Facultad de Ciencias de la Ingeniería. 259 p. (tesis de pregrado). Recupero de: <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2006/bmfcia775a/doc/bmfcia775a.pdf>
- ASCE 7-16, (2016). American Society of Civil Engineers, Minimum design loads for buildings and other structures, 7, 7–10
- BAUTISTA A. M. CARREÑO E. H., (2018) DESEMPEÑO DE AISLADORES DE BASE EN TANQUES DE AGUA ELEVADOS SOMETIDOS A ACCIONES SÍSMICAS, (tesis de pregrado). Recupero de: <http://tangara.uis.edu.co/>

Bayraktar, A., Keypour, H., Naderzadeh, A. (2012) “Application of Ancient Earthquake Resistant Method in Modern Construction Technology”. 15 World Conference on Earthquake Engineering (15WCEE), Lisboa, 2012.
http://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/WCEE2012_5773.pdf

Chopra, A.K. (2014) “Dynamics of Structures. Theory and applications to Earthquake Engineering” Prentice Hall.

Congreso de Colombia, Ley 400. 1997.

Congreso de Colombia, Ley 1229. 2008.

Diederix, Hans; Catalina Hernández M.; Eliana Torres J.; Jairo Alonso Osorio, and Paola Botero. 2009. Resultados preliminares del primer estudio paleosismológico a lo largo de la Falla de Bucaramanga, Colombia. Ingeniería, Investigación y Desarrollo, UPTC 9. 18–23. Accessed 2017-06-20.

DOSHIN RUBBER, (2018). BASE ISOLATION HIGH DAMPING RUBBER BEARING, langor Darul Ehsan, Malaysia. Recuperado de: <https://doshinrubber.com/high-damping-rubber-bearing/>

Duque, M, d., & Oviedo, J. A. (Junio de 2010). Situación de las técnicas de control de respuesta sísmica en Colombia. Colombia.

EERI, (2013). Earthquake engineering research institute. The Mw 6,6 Earthquake of April 20, 2013 in Lushan, China. Special Earthquake Report,

EERI, (2012). Earthquake engineering research institute. Performance of Engineered Structures in the Mw 9.0 Tohoku, Japan, Earthquake of March 11, 2011. Special Earthquake Report,.

Genatios. C. Lafuente M., (Noviembre de 2016, Caracas), INTRODUCCIÓN AL USO DE AISLADORES Y DISIPADORES EN ESTRUCTURAS. Pp.37. Recuperado de: <http://scioteca.caf.com/bitstream/handle/123456789/1213/Uso%20de%20aisladores%20y%20disipadores%20en%20estructuras.pdf>

Hanson, Robert D. (1993), Supplemental damping for improved seismic performance in Earthquake Spectra, Aug 1993 , vol 9, n. 3, pp 319-370.

Kirikov, B. (1992) “History of Earthquake Resistant Construction” Instituto de Ciencias de la Construcción, Eduardo Torrojas, Madrid.

Korswagen P., Arias J. y Huaranga P.(2012) ANÁLISIS Y DISEÑO DE ESTRUCTURAS CON AISLADORES SÍSMICOS EN EL PERÚ (tesis de pregrado). Recupero de: <https://www.worldcat.org/title/analisis-y-diseno-de-estructuras-con-aisladores-sismicos-en-el-peru/oclc/820172810>

- Lafuente, Marianela, Grases, José, Genatios, Carlos (Caracas, noviembre 2014) Revisión de la Normativa sísmica en America Latina. CAF,. Recuperado de: <http://scioteca.caf.com/handle/123456789/897>
- Lopez, C. F.(2016) Consecuencias de la posible aplicación a Colombia de las normas más actuales sobre asilamiento sísmico de edificios. Revista internacional de Ingenieria de Estructuras. Vol. 21,4,415-436
- MAGEBA, (2013). Protección antisísmica mageba –preservación fiable de estructuras, New York. Recuperado de: <https://www.mageba.net/data/docs/es/2573/PROSPECT-LASTO-HDRB-ch-en.pdf?v=1.1>
- Martelli, A., Clemente, P., De Stefano, A., Forni, M. & Salvatori, A., (2014), Recent development and application of seismic isolation and energy dissipation and conditions for their correct use. In: Perspectives on European Earthquake Engineering and Seismology, Springer, pp. 449–488
- Masahiko H. & Okamoto, Shin. (eds). (September 2006.) Response control and seismic isolation of buildings. CIB/TG44. Taylor and Francis.
- Mason, W., (2015). Seismic isolation – the gold standard of seismic protection. STRUCTURE magazine.

- Matsagar, V. A. & Jangid R. S., (2008). Base Isolation for Seismic Retrofitting of Structures. Pract. Period. Struct. Des. Constr, 13(4): 175-185. Downloaded from ascelibrary.org by Universidad Industrial de Santander on 01/18/19. Copyright ASCE. For personal use only; all rights reserved.
- Nagarajaiah, S. & Sun, X., (1996). Seismic performance of base isolated buildings in the 1994 Northridge earthquake. Proceedings of the 11th WCEE.. DOI: 10.1061/(ASCE) 0733-9445(2000)126:10(1177)
- Oviedo, J. A & Duque, M, d., (16 de septiembre de 20006) Sistemas de control de respuesta sísmica en edificaciones
- Paris, G.; Machette, M.N.; Dart, R.L.; Haller, K.M. (2000). Map and Database of Quaternary Faults in Colombia and its Offshore Regions: U.S. Geological Survey Open-File Report 00-018, 61 p., 1 plate (1:2.000.000 scale).
- PTE, (2019). APOYO DE NEOPRENO, langor Darul Ehsan, Malaysia. Recuperado de: <https://doshinrubber.com/high-damping-rubber-bearing/> (Febrero 2019)
- Reid, H.F. (1910). The Mechanics of the Earthquake. The California Earthquake of April 18, 1906, Report of the State Investigation Commission, Vol.2, 192 p.

Rochel Awad, R. (2012). Análisis y diseño sísmico de edificios (2a ed.). Medellín: Fondo Editorial Universidad EAFIT.

SAP 2000 (Versión 20) [Software]. (2019). CSI SPAIN. Obtenido de :
<http://www.csiespana.com/software/2/sap2000>

SEISMOSOFT. Earthquake Engineering Software Solutions. [En línea]. Obtenido de:
<http://www.seismosoft.com/seismomatch>.

SKINNER R. I. , ROBINSON W. H., Y MCVERRY G. H. (August 1993). AN INTRODUCTION TO SEISMIC ISOLATION. England, WILEY pp. 20-23, 2-4.

Zaoqiang Dacheng Rubber Co, (2014). High damping rubber bearing, China. Recuperado de:
<http://www.bridgebearings.org/product/high-damping-rubber-bearing.html>