



Análisis y Evaluación de Sistemas de Aislamiento Sísmico de Base en Edificaciones de
Uso Habitacional en la ciudad de Bogotá

Andres Felipe Pardo Quintero

Facultad de Ingeniería civil

Universidad Piloto de Colombia

Bogotá, Colombia

2025

Tabla de contenido

Resumen.....	5
Abstract.....	5
Introducción.....	6
Justificación	9
Objetivos	11
Objetivo general	11
Objetivos específicos.....	12
Marco teórico	12
Sistemas de control estructural	12
Sistemas Pasivos	13
Sistemas Activos	14
Sistemas Semi-Activos.....	15
Aisladores de base elastoméricos.....	16
Aisladores de deslizamiento tipo péndulo.....	17
Antecedentes – Estado del Arte.	18
Contexto sísmico y geológico	24
Datos Geológicos y Sísmicos de las Zonas de Alta Sismicidad en Colombia.....	24
Evaluación Geológica y Sísmica de Bogotá.....	27
Riesgo Sísmico en Bogotá: Contexto Histórico y Actual.....	28
Normativas y regulaciones locales	30
Colombia:.....	30
A nivel mundial:.....	31
Diseño Metodológico.....	34
Etapa 1: Selección de Edificaciones.....	35

Etapa 2: Recopilación de Datos	35
Etapa 3: Análisis y Evaluación.....	35
Etapa 4: Conclusiones y Recomendaciones.....	36
Etapa 5: Documentación y Presentación	36
Edificación de estudio	37
Perfil estratigráfico.....	40
Cimentación.....	41
Descripción de la estructura.....	41
Enfoque tradicional de diseño de edificaciones conforme al reglamento colombiano de construcción sismo resistente (NSR-10)	43
Irregularidades	48
Código para el diseño de estructuras aisladas sísmicamente de Estados Unidos (ASCE-7-16)	53
Implementación de los aisladores sísmicos en la estructura de estudio	56
Sismo máximo considerado (MCE)	61
Coeficiente de amortiguamiento	66
Periodo de vibración objetivo (TM Objetivo)	67
1. Principios de Aislamiento Sísmico	67
2. Caracterización de Edificios con Aisladores Sísmicos	68
3. Efecto de los Aisladores Sísmicos	68
4. Beneficios de un Periodo Largo	68
Rigidez efectiva objetivo (KM objetivo)	69
Desplazamiento máximo objetivo (DM objetivo)	70
Fuerzas mínimas de diseño.....	71
Implementación de los aisladores sísmicos de base en el modelo estructural	72
Configuración del Modelo Estructural	74

Especificación de Aisladores de Base	75
Aplicación de Cargas en los Modelos Estructurales.....	76
Aplicación práctica en el modelo	78
Ubicación de los Aisladores Sísmicos en la Estructura	79
Definición de Propiedades de los Aisladores Sísmicos en Robot Structural Analysis.....	80
Datos para el modelamiento de la estructura e implementación de los aisladores de base	81
Definición de Propiedades de los Aisladores Sísmicos en Robot Structural Analysis.....	82
Análisis y Evaluación de Resultados.....	84
Optimización y Validación de Parámetros.....	84
Comparación Espectral de Configuraciones con y sin Aislamiento	84
1. Espectro de diseño aplicado	84
Cortantes en la base de la estructura	86
Desplazamientos máximos en el edificio	87
Límites para las derivas.....	88
Análisis de factibilidad económica de la implementación de aisladores sísmicos	93
Costos de Implementación.....	94
Comparación con el Costo Total de la Edificación.....	94
Beneficios Económicos y Comparación con Alternativas Convencionales	95
Limitaciones del estudio y recomendaciones para trabajos futuros.....	96
Conclusiones.....	96
Referencias Bibliográficas.....	101
Referencias de Tablas	102
Referencias de Figuras	103

Resumen

La presente tesis aborda la implementación de aisladores sísmicos de base, específicamente elastoméricos, en una estructura residencial localizada en la ciudad de Bogotá, Colombia, una región que presenta una actividad sísmica moderada. La edificación está construida con un sistema de muros estructurales, el cual es comúnmente utilizado en proyectos residenciales de la región debido a su desempeño estructural.

El objetivo principal de este estudio es evaluar el impacto de la incorporación de aisladores sísmicos en la respuesta estructural de la edificación, considerando parámetros como desplazamientos, fuerzas internas y periodos de vibración, para comparar su desempeño frente a un diseño convencional.

Se realizó un análisis numérico utilizando software especializado, siguiendo los lineamientos de la normativa sismo-resistente colombiana (NSR-10). Se modelaron dos escenarios: uno con la estructura tradicional y otro con la inclusión de los aisladores sísmicos. Los resultados muestran que el uso de aisladores reduce significativamente las demandas sísmicas sobre la estructura, mejorando la seguridad y la habitabilidad durante un evento sísmico.

Palabras clave: aisladores sísmicos, Bogotá, NSR-10, muros estructurales, análisis sísmico, ingeniería estructural.

Abstract

This thesis addresses the implementation of seismic base isolators, specifically elastomeric, in a residential structure located in the city of Bogota, Colombia, a region with moderate seismic activity. The building is constructed with a structural wall system, which is commonly used in residential projects in the region due to its structural performance.

The main objective of this study is to evaluate the impact of the incorporation of seismic isolators on the structural response of the building, considering parameters such as displacements, internal forces and vibration periods, in order to compare its performance with a conventional design.

A numerical analysis was carried out using specialized software, following the guidelines of the Colombian seismic-resistant standard (NSR-10). Two scenarios were modeled: one with the traditional structure and the other with the inclusion of seismic isolators. The results show that the use of isolators significantly reduces the seismic demands on the structure, improving safety and habitability during a seismic event.

Introducción

En Colombia una de las mayores preocupaciones en el ámbito de la Ingeniería civil ha sido la respuesta de las edificaciones en cuanto a un evento sísmico, ya que de ello depende una gran cantidad de vidas y nosotros como Ingenieros debemos velar por mitigar los daños que estos sucesos pueden ocasionar. La preocupación se acentúa debido a la ubicación geográfica del país, ya que se haya en una región sísmicamente activa, que hace que se convierta en uno de los grandes retos de la Ingeniería civil en Colombia. “Las principales fallas geológicas del país se encuentran ubicadas en su mayor extensión en territorio urbano” (Suárez, et all, 2014), es decir edificios, vías, colegios, puentes están en constante peligro y como resultado la ingeniería trabaja para evitar tragedias a gran escala.

Por ello se han estudiado métodos que contribuyan a la minimización de daños en la estructura y en general a la vida humana, entre estos se encuentra el refuerzo sísmico, que mejora la capacidad sísmica de estructuras existentes mediante la adición de elementos estructurales, como el reforzamiento de conexiones débiles y áreas críticas, este proceso es el que se usa generalmente en Colombia. Como se mencionaba, los principales retos de la ingeniería civil están en innovar, estudiar e implementar nuevos métodos para una mejor respuesta sísmica en caso de que se lleguen a presentar estos eventos en el país, por ello se ha optado por poner en práctica métodos más innovadores, como los sistemas de control de vibraciones para reducir las amplitudes de las oscilaciones sísmicas. Para ello se utilizan amortiguadores de masa sintonizada, amortiguadores de viscosidad, entre otros.

Se encuentra también el uso de dispositivos de aislamiento sísmico entre la superestructura y la subestructura para reducir la transferencia de movimiento sísmico a la estructura. Actualmente en Colombia son pocos los edificios que cuentan con este sistema de aislamiento, esto debido a que no hay mucha información acerca de la respuesta de las estructuras en condiciones de un evento sísmico con las diferentes condiciones que se presenten conforme a la geología del país. Además, no se ha implementado una norma que regule el uso e implantación de estos sistemas en el país.

Hoy en día, más de 23.000 estructuras en 30 países están protegidas por sistemas de control pasivo, como el aislamiento sísmico y la disipación de energía. Estas medidas promueven la seguridad ante eventos sísmicos en todo el mundo. (Martelli, Clemente, De Stefano, Forni & Salvatori, 2014).

Bogotá, la capital de Colombia, se encuentra en una zona de moderada a alta vulnerabilidad sísmica debido a su ubicación en una región sísmicamente activa. Aunque la ciudad no ha experimentado terremotos devastadores en tiempos recientes, la amenaza sísmica persiste y se reconoce la necesidad de prepararse para eventos potencialmente catastróficos. La densidad de población y la concentración de infraestructuras vitales hacen que la ciudad sea especialmente susceptible a los impactos de un terremoto. En este contexto, la implementación de aisladores sísmicos emerge como una estrategia crucial para mejorar la resiliencia de las estructuras en Bogotá. Estos dispositivos pueden reducir significativamente los daños estructurales al permitir que los edificios se desplacen lateralmente de manera controlada durante un terremoto, disipando así la energía sísmica y protegiendo la integridad de las edificaciones y la seguridad de los ocupantes.

Dada la importancia de garantizar la funcionalidad continua de las infraestructuras críticas después de un evento sísmico, como hospitales, centros de emergencia y servicios públicos, la implementación de aisladores sísmicos cobra una relevancia aún mayor en Bogotá. Además, la preservación del patrimonio arquitectónico de la ciudad, que incluye edificaciones históricas y culturales, también justifica la adopción de estas tecnologías de mitigación del riesgo sísmico.

Aunque en los últimos años no ha ocurrido un sismo intenso por la baja frecuencia relativa de eventos fuertes, no es correcto suponer que así han de seguir las cosas, por lo que el Distrito ha dirigido enormes esfuerzos para fortalecer la gestión integral de riesgo sísmico en la ciudad. (IDIGER, 2009, p. 18)

Sin embargo, la implementación de aisladores sísmicos en Bogotá presenta desafíos únicos, que van desde consideraciones técnicas y de diseño hasta aspectos logísticos y económicos. Es necesario llevar a cabo evaluaciones detalladas del riesgo sísmico, análisis de vulnerabilidad estructural y estudios de costos-beneficios para identificar las áreas prioritarias y optimizar la asignación de recursos.

Una edificación diseñada siguiendo los requisitos de este reglamento, debe ser capaz de resistir, además de las fuerzas que le impone su uso, temblores de poca intensidad sin daño, temblores moderados sin daño estructural, pero posiblemente con algún daño a los elementos no estructurales y un temblor fuerte con daños a elementos estructurales y no estructurales, pero sin colapso (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo territorial, 2010, págs. A-2)

Lo que se pretende con la presente investigación es llevar a cabo una evaluación que nos permita identificar el comportamiento de una estructura de gran altura con un sistema de muros estructurales, que presente un sistema de aislamiento de base, como lo es el aislador con núcleo de plomo (LRB), haciendo énfasis en la comparativa de estos sistemas, además de la estructura fija como tal, con el objetivo de dar información precisa acerca del costo-beneficio que traería al país implementar estos sistemas en los rascacielos que están y serán construidos a lo largo del territorio y principalmente en la ciudad de Bogotá.

En este sentido, este trabajo surge para responder al enfoque planteado por Duque y Oviedo (2009).

“En Colombia, muchos promotores desconocen las técnicas de control estructural, otros desconfían de sus ventajas tanto económicas como estructurales, por lo tanto, hacen falta proyectos de investigación y aplicación donde se diseñen edificaciones con los mismos criterios sísmicos, con control de respuesta sísmica y sin él y se haga una comparación económica y técnica que permita verificar o derrumbar estos preconceptos.” (Duque y Oviedo, 2009, p. 123).

Para ampliar el alcance de las recomendaciones propuestas por Duque y Oviedo, surge la siguiente interrogante técnica: ¿Cuál es la viabilidad y eficacia de la implementación de aisladores sísmicos en edificios de gran altura en Bogotá sobre la respuesta estructural ante eventos sísmicos, considerando factores geotécnicos, características sísmicas locales y criterios de diseño sísmico? Esta pregunta busca esclarecer aspectos fundamentales respecto a la implementación de tecnologías emergentes en la mitigación del riesgo sísmico, que aún carecen de evidencia sólida y certeza en el contexto nacional.

Justificación

En el pasado, Colombia ha experimentado eventos sísmicos significativos que han destacado la necesidad de mejorar las prácticas de diseño y construcción, especialmente en edificios de gran altura. “Debido a la ubicación geográfica colombiana, un 85% de la población se encuentra vulnerable a la presencia y daños de un sismo” (Betancourt, N., & Galvis, F., 2015).

La implementación de sistemas de aislamiento sísmico de base, cuyo principio fundamental es separar la estructura del suelo por medio de dispositivos llamados aisladores sísmicos, de manera que el sismo no afecte directamente la estructura, reduciendo así los daños en general (Kelly, 2001, págs. 1-2). Se presenta como una solución efectiva para mejorar la capacidad de respuesta sísmica, este enfoque no solo contribuirá a la seguridad de las personas, sino que también protegerá la inversión en infraestructuras críticas, reduciendo las pérdidas económicas asociadas con

reparaciones y reconstrucciones posteriores a eventos sísmicos. Además, la investigación en cuestión contribuirá al avance de la ingeniería estructural en el contexto colombiano, generando conocimientos que podrían ser aplicados en futuros proyectos y mejorando las prácticas de construcción en el país.

Esta investigación desempeñará un papel fundamental en el desarrollo de estrategias innovadoras para la gestión del riesgo sísmico en el ámbito de la ingeniería civil en Colombia. La recopilación sistemática y el análisis riguroso de datos relacionados con la efectividad de los sistemas de aislamiento de base en edificios de gran altura permitirán identificar áreas de mejora y optimización en el diseño y la implementación de estructuras ante eventos sísmicos. Este enfoque contribuirá a fortalecer la resiliencia de las infraestructuras urbanas ante posibles desastres naturales, ofreciendo soluciones técnicas sólidas y adaptadas a las condiciones específicas del contexto colombiano. Los hallazgos obtenidos no solo enriquecerán el conocimiento teórico en el campo de la ingeniería estructural, sino que también tendrán un impacto práctico significativo al proporcionar recomendaciones y directrices concretas para la planificación y ejecución de proyectos de construcción y la normativa con la cual se implementan estos en el país. En última instancia, esta investigación impulsará la adopción de prácticas constructivas más seguras y sostenibles, contribuyendo así al desarrollo integral y la seguridad de las comunidades urbanas en Colombia.

La implementación de tecnologías que mejoren la resiliencia sísmica no solo protege vidas y bienes, sino que también promueve la sostenibilidad urbana al garantizar la continuidad operativa de las ciudades después de eventos sísmicos, facilitando la recuperación y reduciendo el impacto socioeconómico.

Por otro lado, Dusi, Mezzi y Fuller (2008) examinaron en detalle los aspectos técnicos, económicos y sociales del aislamiento sísmico en grandes proyectos de vivienda. Su estudio, basado en un proyecto de 10,000 unidades de apartamentos en Japón, demostró que la utilización de sistemas aporricados aislados sísmicamente generó un ahorro del 20% en costos. Estos resultados subrayan el potencial económico del aislamiento sísmico en proyectos de construcción a gran escala.

En este contexto, la implementación de tecnologías innovadoras, como los aisladores sísmicos, emerge como una estrategia prometedora para mejorar la resiliencia de las edificaciones de gran altura en Bogotá. Al comprender mejor los beneficios y las limitaciones de los aisladores sísmicos, se pueden tomar decisiones informadas que mejoren la capacidad de la ciudad para hacer frente a futuros eventos sísmicos y promuevan un crecimiento urbano más seguro y sostenible.

Para complementar la investigación teórica y conceptual, se propone la realización de simulaciones computacionales que permitan evaluar el comportamiento sísmico de una edificación en la ciudad de Bogotá, utilizando el aislador de base, (Aislador con núcleo de plomo (LRB)). El sistema utilizado para el proceso constructivo de los edificios de prueba es un sistema de muros estructurales, cuyas características se detallarán posteriormente. Estas simulaciones proporcionarán datos cruciales sobre la eficacia de los aisladores sísmicos en condiciones reales de la capital de país, lo que permitirá validar los modelos teóricos y mejorar nuestra comprensión del rendimiento sísmico de esta tecnología en el contexto de la ciudad y así poder establecer una normativa la cual nos proporcione todas las herramientas teóricas para llevar a cabo este innovador sistema.

Objetivos

Objetivo general

-Analizar la efectividad y la pertinencia en cuanto a la implementación de sistemas de aislamiento sísmico de base en edificios de gran altura dentro del contexto urbano de Bogotá, evaluando su impacto en la seguridad estructural y la mitigación del riesgo sísmico en la región.

Objetivos específicos

- Analizar el efecto de parámetros particulares del sistema de aislamiento de base en la capacidad de mitigar los efectos sísmicos en edificaciones de gran altura, mediante la recopilación y análisis de información
- Realizar un análisis comparativo de la respuesta sísmica de la estructura con sistemas de aislamiento de base, como lo es el aislador con núcleo de plomo (LRB) y la estructura fija, considerando diversas condiciones sísmicas.
- Evaluar la utilidad de los aisladores de base en estructuras de edificaciones en la ciudad de Bogotá, considerando su impacto en la seguridad estructural frente a eventos sísmicos en una zona de actividad moderada.

Marco teórico

Sistemas de control estructural

Los sistemas de control estructural son elementos fundamentales en la disciplina de la ingeniería sísmica, desempeñan un papel crucial en la protección y preservación de estructuras frente a los efectos adversos de los terremotos. Estos sistemas se basan en una comprensión profunda de los principios de la dinámica estructural y se diseñan con el objetivo de modificar las características dinámicas de una estructura para mitigar las respuestas sísmicas. La ingeniería detrás de estos sistemas implica la aplicación de estrategias que pueden incluir desde la introducción de dispositivos pasivos, como aisladores sísmicos y amortiguadores de masa sintonizados, hasta la implementación de sistemas activos que emplean actuadores electromecánicos o hidráulicos controlados por algoritmos de retroalimentación en tiempo real. Además, se han desarrollado sistemas semiactivos que combinan elementos de los sistemas pasivos y activos,

adaptando dinámicamente las propiedades mecánicas de la estructura en función de las condiciones de carga sísmica. Esta variedad de enfoques permite a los ingenieros diseñar soluciones adaptadas a las necesidades específicas de cada estructura y entorno sísmico, buscando optimizar su desempeño en términos de seguridad, funcionalidad y resiliencia frente a eventos sísmicos.

Sistemas Pasivos

Los sistemas pasivos de control estructural constituyen una parte integral de las estrategias de mitigación del riesgo sísmico en la ingeniería civil. Estos sistemas se centran en la introducción de dispositivos mecánicos o hidráulicos que interactúan con la estructura para disipar la energía sísmica y reducir las fuerzas transmitidas durante un evento sísmico. Los aisladores sísmicos, uno de los dispositivos pasivos más utilizados, consisten en elementos flexibles o deslizantes colocados entre la superestructura y la cimentación. Estos aisladores permiten que el edificio se desplace lateralmente de manera controlada, reduciendo así las fuerzas sísmicas transmitidas a la estructura y protegiendo su integridad. Además, los amortiguadores de masa sintonizados son otro ejemplo de sistemas pasivos que se utilizan para absorber y disipar la energía sísmica. Estos dispositivos, que incluyen masas adicionales conectadas a la estructura mediante sistemas de resortes y amortiguadores, están diseñados para minimizar las oscilaciones estructurales y reducir los daños asociados a los movimientos sísmicos.

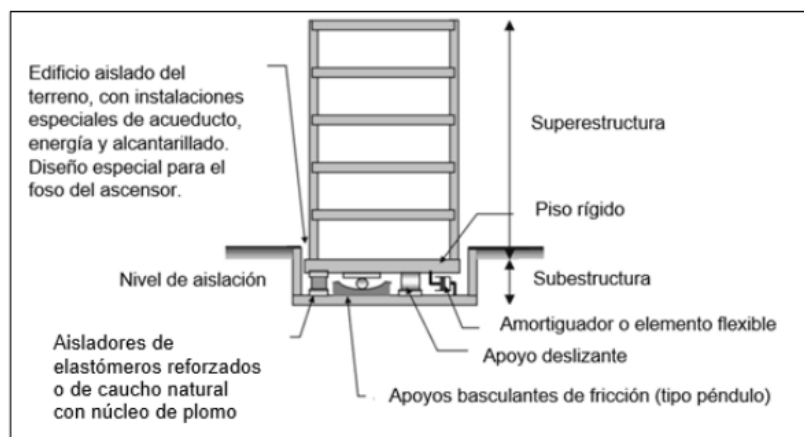


Figura 1. Esquema de estructura con sistema de control pasivo tipo aislamiento sísmico de base. Nota. Tipos de sistemas de control pasivo de base más utilizados Fuente: Oviedo y Duque (2006).

Sistemas Activos

Los sistemas activos de control estructural representan una innovación significativa en la ingeniería sísmica, ya que ofrecen la capacidad de ajustar dinámicamente la respuesta estructural de un edificio durante un evento sísmico. Estos sistemas utilizan actuadores electromecánicos o hidráulicos controlados por algoritmos de retroalimentación en tiempo real para aplicar fuerzas adicionales a la estructura y contrarrestar las fuerzas sísmicas. La información sobre el movimiento del suelo y las respuestas estructurales se recopila a través de sensores, lo que permite a los actuadores ajustar la respuesta estructural en tiempo real para minimizar los desplazamientos y aceleraciones inducidos por el terremoto. Si bien los sistemas activos ofrecen un control preciso sobre la respuesta estructural, su implementación puede ser compleja y costosa, requiriendo una infraestructura de control avanzada y un mantenimiento regular para garantizar su funcionamiento óptimo.

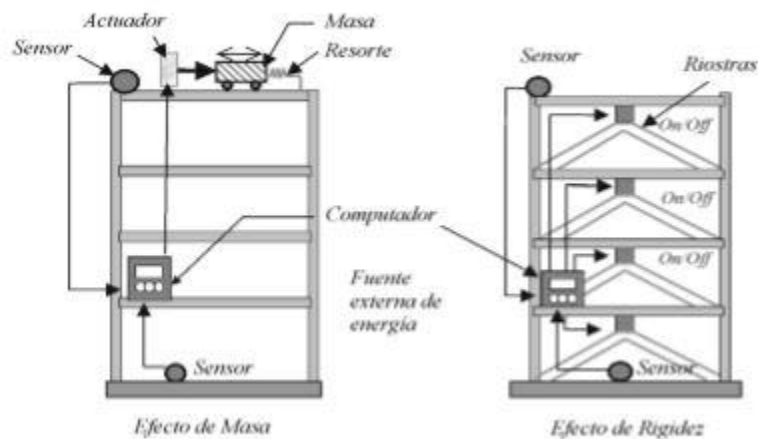


Figura 2. Esquema de estructura con sistema de control pasivo. Nota. Se presenta un esquema conceptual de una estructura equipada con un sistema de control activo para la mitigación del riesgo sísmico. Fuente: Oviedo y Duque (2006).

Sistemas Semi-Activos

Los sistemas semiactivos de control estructural representan una solución intermedia entre los sistemas pasivos y activos, ofreciendo un control adaptativo de la respuesta estructural sin la necesidad de una infraestructura de control tan sofisticada como la requerida por los sistemas totalmente activos. Estos sistemas utilizan dispositivos controlados para ajustar dinámicamente las propiedades mecánicas de la estructura en función de las condiciones de carga sísmica. Un ejemplo común de sistema semiactivo es el amortiguador de control de flujo, que utiliza un fluido viscoso para ajustar la rigidez y el amortiguamiento de la estructura en respuesta a las fuerzas sísmicas. Estos sistemas ofrecen una solución versátil y eficaz para mejorar la resiliencia de las estructuras frente a eventos sísmicos, adaptándose a las condiciones cambiantes del entorno sísmico sin la complejidad y los costos asociados con los sistemas totalmente activos.

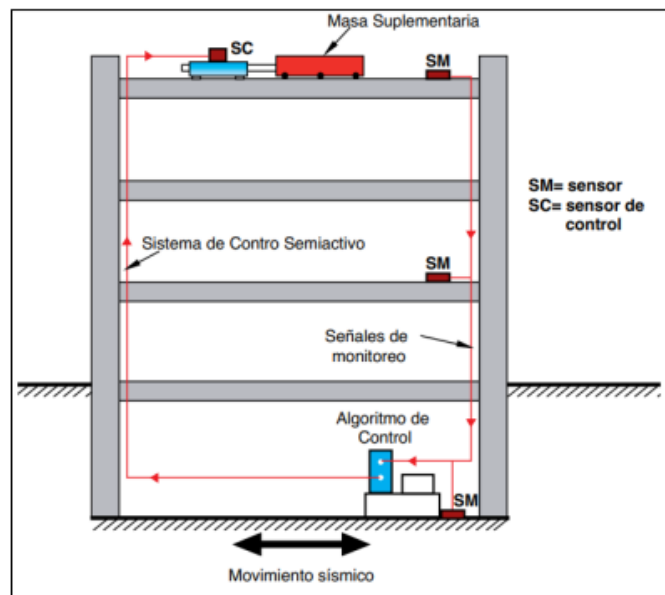


Figura 3. Esquema de estructura con sistema de control semi activo.
Nota. En el esquema se ilustran los componentes principales del sistema. Fuente: Oviedo y Duque (2006).

Cada tipo de sistema de control estructural ofrece diferentes enfoques para mejorar la resiliencia de las estructuras frente a eventos sísmicos, con sus propias ventajas y desafíos técnicos asociados. La selección y diseño apropiados de estos sistemas requieren un profundo conocimiento de las propiedades dinámicas de la estructura y del entorno sísmico, así como una cuidadosa consideración de los requisitos de desempeño y las limitaciones de costos y mantenimiento.

Aisladores de base elastoméricos

están compuestos principalmente de elastómeros, materiales de goma sintética altamente flexibles y resistentes. Estos elastómeros permiten que el edificio se desplace lateralmente durante un terremoto, absorbiendo y disipando la energía sísmica generada por el movimiento del suelo. Esta capacidad de deformación controlada reduce las fuerzas transmitidas a la superestructura, minimizando así los daños estructurales y protegiendo la vida humana.

La eficacia de los aisladores de base elastoméricos radica en su capacidad para proporcionar un alto nivel de amortiguamiento sísmico y aislamiento de vibraciones, lo que ayuda a preservar la integridad estructural del edificio en condiciones de estrés sísmico extremo. Además, estos dispositivos son altamente duraderos y requieren poco mantenimiento, lo que los convierte en una opción atractiva para proyectos de construcción en zonas de alta actividad sísmica como Bogotá.

En resumen, los aisladores de base elastoméricos son componentes esenciales en el diseño de sistemas de aislamiento sísmico para edificios en Bogotá, ofreciendo una solución efectiva y confiable para mejorar la resiliencia estructural frente a eventos sísmicos. Su capacidad para absorber y disipar la energía del terremoto los convierte en una herramienta invaluable para proteger la infraestructura y garantizar la seguridad de los ocupantes durante un evento sísmico.



Figura 4. Aislador sísmico de base tipo elastomérico. Nota. Esquema de los componentes del aislador sísmico elastomérico de base. Fuente: Grupo grasa (2020).

Aisladores de deslizamiento tipo péndulo

Se componen de un péndulo suspendido dentro de una estructura metálica, con un mecanismo de fricción entre las superficies de contacto. Durante un terremoto, el péndulo se desplaza lateralmente debido al movimiento del suelo, mientras que la fricción entre las superficies de contacto disipa la energía sísmica, amortiguando así las fuerzas transmitidas a la estructura.

La eficacia de los aisladores de deslizamiento tipo péndulo radica en su capacidad para permitir un desplazamiento lateral controlado de la superestructura, reduciendo la aceleración sísmica y protegiendo así la integridad del edificio. Estos dispositivos ofrecen un alto nivel de amortiguamiento y aislamiento de vibraciones, lo que ayuda a minimizar los daños estructurales y a preservar la seguridad de los ocupantes durante un terremoto.

Además, los aisladores de deslizamiento tipo péndulo son altamente duraderos y requieren poco mantenimiento, lo que los convierte en una opción atractiva para proyectos de construcción en zonas de alta actividad sísmica. Su diseño simple y efectivo los hace adecuados para una variedad de aplicaciones, desde edificios residenciales hasta estructuras críticas como hospitales y centros de emergencia.

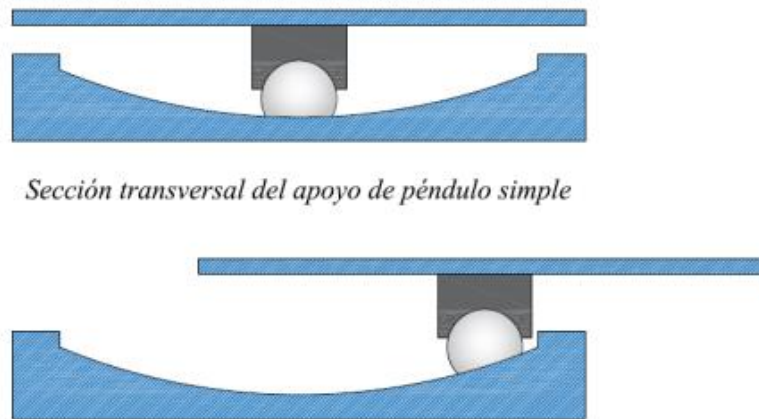


Figura 5. Aislador de base tipo péndulo de fricción simple. Nota. Corte transversal de un sistema de péndulo de fricción y su deslizamiento durante un evento sísmico. Fuente: Ramírez Tapia (2021).

Antecedentes – Estado del Arte.

En la última década la amenaza sísmica ha sido un evento que se ha presentado en repetidas ocasiones a lo largo del mundo generando daños exponenciales no solo en la vida humana, sino que también en la infraestructura urbana. La ingeniería sísmica ha evolucionado para abordar estos desafíos, y una de las estrategias emergentes y prometedoras es la implementación de aisladores sísmicos en edificaciones. Estos dispositivos ofrecen la posibilidad de mitigar los efectos de las fuerzas sísmicas al permitir que la estructura se desplace de manera controlada, reduciendo así la carga sobre los elementos estructurales críticos. Esta innovadora técnica ha sido implementada con éxito en diversas partes del mundo, mostrando resultados alentadores en términos de reducción de daños y pérdidas.

“Japón es el país que lidera el escalafón a nivel mundial con 8000 estructuras aisladas, luego las diferentes aplicaciones en China, donde se han utilizado estos sistemas

principalmente en 4000 edificios, después se enumeran las estructuras con aislación sísmica en Rusia con 600 edificios, en Estados Unidos 250 edificios y en Italia un total de 400 edificios." (González, S. 2020, p. 38).

La información relacionada con aisladores sísmicos abarca un amplio espectro de investigaciones y desarrollos tecnológicos. Países como Japón, Nueva Zelanda y Chile han liderado la implementación de estos dispositivos en sus proyectos de construcción, demostrando su eficacia en la preservación de la vida humana y la integridad de las estructuras. Estos casos de éxito han generado un interés creciente en la comunidad internacional, motivando investigaciones adicionales y fomentando la adopción de tecnologías sísmicas avanzadas. El país que más ha implementado este sistema es Japón, seguido de china, esto debido también a la zona crítica de amenaza sísmica en la cual se encuentran estos países. "A nivel mundial esta técnica es bastante empleada, siendo Japón el líder con más de 8000 edificaciones aisladas sísmicamente" (Piscal-Arévalo & Francisco López-Almansa, 2018, p. 1).

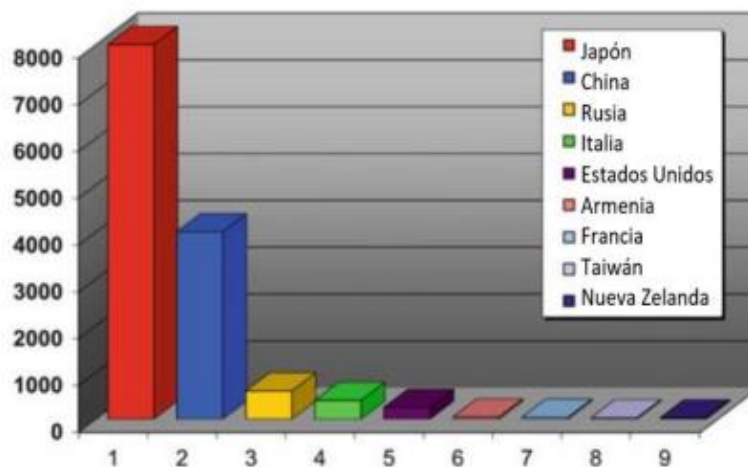


Figura 6. Número de Edificaciones construidas con aislamiento sísmico a nivel mundial hasta el año 2014. Nota. Este gráfico proporciona una visión general del avance y la tendencia global en la implementación de aislamiento sísmico en la construcción de edificaciones. Fuente: Martelli et al., 2014

En el contexto colombiano, la aplicación generalizada de aisladores sísmicos aún enfrenta desafíos significativos. Factores como la diversidad geográfica, las

características geotécnicas específicas, la falta de una norma técnica propia y las limitaciones económicas presentan obstáculos que requieren una comprensión detallada y soluciones adaptadas. Algunas ciudades han optado por utilizar estos sistemas de aislamiento en sus edificaciones, entre las cuales destacan, Manizales, Pereira y Cali, entre otras. Como se puede observar más adelante en una tabla de datos (Ver tabla 1).

Como se puede observar, Bogotá que es la capital del país, no cuenta con un papel importante en el desarrollo de estos sistemas que se han ido implementando en proyectos constructivos a lo largo del mundo. Es aquí donde surge la pregunta de si es necesario empezar a tener en cuenta estos sistemas en la planificación de futuros proyectos a gran escala en la ciudad, ya que se evidencio en los sismos ocurridos a lo largo del año 2023, que algunas estructuras en la ciudad de Bogotá tuvieron daños leves o algo significativos que afectan la integridad de la edificación, lo que incurre en altas sumas de dinero para llevar a cabo las reparaciones pertinentes.

Es crucial realizar una investigación exhaustiva para contribuir eficazmente a la implementación de estos sistemas innovadores en la ciudad de Bogotá, donde actualmente hay una escasa presencia de edificaciones que incorporan esta tecnología. Dada la importancia de aumentar la resiliencia sísmica de las estructuras en una zona sísmicamente activa como Bogotá, es imperativo explorar y entender los desafíos y oportunidades específicos asociados con la adopción de sistemas de aislamiento sísmico en el contexto urbano de la ciudad. Mediante un análisis detallado de factores técnicos, económicos y regulatorios, se puede identificar cómo estos sistemas pueden integrarse de manera efectiva en el proceso de diseño y construcción de edificaciones en Bogotá, contribuyendo así a fortalecer la capacidad de la ciudad para enfrentar eventos sísmicos y proteger la vida y la propiedad de sus habitantes.

Registro de edificios con aislamiento de base en Colombia hasta 2019					
Nombre de Edificación	Ciudad	Año de construcción Comienzo / Finalización	Tipo de Estructura	Número de aisladores	Area edificación
Clínica "COMFANDI"	Cali	2009/2011	Hospital	163	72000 m2
Clínica "IMBANACO"	Cali	2010/2015	Hospital	114	81000 m2
"EDIFICIO FUNDADORES" Universidad Autónoma de Manizales	Manizales	2013/2014	Universidad	55	12500 m2
"CENTRO CULTURAL ROGELIO SALMONA" ETAPA I Universidad de Caldas	Manizales	2016/2018	Universidad	88	7800 m2
Clínica "LOS ROSALES"	Pereira	2014	Hospital	24	9000 m2
"TORRE EMBLEMÁTICA" Universidad de Manizales	Manizales	2018	Universidad	20	12600 m2
Clínica "LOS ROSALES" ETAPA II, Torre D	Pereira	2018	Hospital	12	4800 m2
"EDIFICIO FUNDADORES" ETAPA II Universidad Autónoma de Manizales	Manizales	2018	Universidad	16	6000 m2
"EDIFICIO DE CIENCIAS" Universidad Eafit	Medellin	En construcción (2019/ ?)	Universidad	12	14000 m2
"EDIFICIO HOSPITALIZACION" fundación Valle Lili	Cali	En construcción (2019/ ?)	Universidad	50	20000 m2

Tabla 1. Edificios con aislamiento sísmico de base en Colombia hasta el año 2019. Nota. La tabla presenta una lista de edificios en Colombia que han sido equipados con sistemas de aislamiento sísmico de base hasta el año 2019. Se incluyen detalles como el nombre del edificio, su ubicación, número de aisladores y a. Fuente: Oviedo y Duque (2006).

Se pretende abordar el tema llevando a cabo una comparativa en la cual se pueda evidenciar los beneficios que pueda llegar a tener la implementación de estos sistemas en edificios de gran altura en la ciudad de Bogotá, analizando principalmente si resulta retributivo a largo plazo.

Los aisladores sísmicos de base son dispositivos que introducen flexibilidad en la base del edificio, absorbiendo y disipando la energía sísmica para reducir las fuerzas transmitidas a la estructura. Los materiales utilizados en la fabricación de aisladores sísmicos incluyen elastómeros, acero inoxidable y materiales compuestos, seleccionados para resistir cargas verticales y horizontales, así como para garantizar durabilidad a lo largo del tiempo. Se examinará detalladamente la interacción entre estos dispositivos y las estructuras, evaluando cómo introducen flexibilidad en la base del edificio para

absorber y disipar eficazmente la energía sísmica mediante el modelamiento en software de las estructuras en estudio.

Oviedo y Duque (2006), analizan el estado actual del uso de estas técnicas en Colombia, donde se identifican las principales tecnologías utilizadas a nivel mundial y se muestra el resultado de una encuesta realizada a ingenieros colombianos que permite exponer las razones por las cuales no se ha utilizado mucho el sistema en Colombia. La conclusión principal de este artículo es la pregunta problema de esta investigación, pues en el artículo invitan a realizar estudios técnicos formales comparando estructuras colombianas diseñadas con o sin aislamiento sísmico de base para derrumbar prejuicios y convencer a los constructores y diseñadores para que usen el sistema.

En la ingeniería sísmica contemporánea, los aisladores sísmicos, particularmente los de tipo péndulo de fricción o de deslizamiento, han emergido como elementos fundamentales en la mitigación del riesgo sísmico en estructuras civiles. Estos dispositivos innovadores, diseñados para absorber y disipar la energía generada por eventos sísmicos, han revolucionado la manera en que se aborda la protección de infraestructuras críticas ante terremotos. Los aisladores sísmicos de péndulo de fricción, por ejemplo, incorporan un mecanismo de amortiguamiento basado en la fricción entre placas metálicas, lo que permite el movimiento relativo entre la superestructura y la infraestructura subyacente. Por otro lado, los aisladores de deslizamiento se caracterizan por su capacidad para desplazarse lateralmente durante un sismo, reduciendo así las fuerzas transmitidas a la estructura.

Los aisladores de tipo deslizante presentan limitaciones debido a su incapacidad para retornar a su posición original. Para abordar este inconveniente, se desarrolló el sistema de péndulo de fricción (FPS), como una variante evolucionada de los aisladores de tipo deslizante. El FPS incorpora una interfaz friccionante esférica que proporciona la rigidez necesaria para restaurar el sistema a su posición inicial, mientras que la fricción entre las

superficies deslizantes contribuye a la disipación de energía. Funcionalmente equivalente a los aisladores de base restringida (LRB) y a los de deslizamiento híbrido (HDRB), el FPS aumenta el periodo fundamental de la estructura y ofrece ventajas adicionales como estabilidad en el periodo, resistencia a la torsión, insensibilidad a cambios de temperatura y alta durabilidad. A pesar de la amplia utilización de los apoyos elastoméricos en el aislamiento sísmico, recientemente ha aumentado la aplicabilidad de los FPS (Buckle et al., 1990; Zayas et al., 1987; Kawamura et al.).

En el contexto de Colombia, un país con una alta amenaza sísmica, la implementación de aisladores sísmicos de base elastomérica y de tipo deslizante en las construcciones de gran envergadura presenta ventajas y desventajas significativas. En primer lugar, los aisladores de base elastomérica ofrecen una excelente capacidad de disipación de energía durante eventos sísmicos, lo que puede reducir significativamente los daños estructurales y proteger la vida humana. Además, su instalación relativamente sencilla y su bajo costo en comparación con otras técnicas de refuerzo sísmico los hacen atractivos para proyectos de construcción en Colombia.

Sin embargo, estos aisladores elastoméricos también presentan algunas limitaciones. Por ejemplo, su vida útil puede ser afectada por factores como la exposición a la intemperie y la degradación con el tiempo, lo que requiere un mantenimiento cuidadoso para garantizar su eficacia a largo plazo. Además, aunque pueden reducir los daños estructurales, los aisladores de base elastomérica no eliminan por completo el riesgo de colapso durante terremotos extremadamente intensos. Por otro lado, los aisladores de tipo deslizante, como los sistemas de péndulo de fricción, ofrecen la ventaja de permitir el desplazamiento lateral controlado de la estructura durante un terremoto, lo que reduce las fuerzas transmitidas y protege la integridad del edificio. Esto puede ser especialmente beneficioso en zonas altamente sísmicas como Colombia, donde los movimientos telúricos pueden ser frecuentes y de gran magnitud.

No obstante, la implementación de aisladores de tipo deslizante también conlleva desafíos. Por ejemplo, la instalación y el diseño de estos sistemas pueden ser más

complejos y costosos que los aisladores elastoméricos, lo que puede limitar su viabilidad en algunos proyectos de construcción. Además, es crucial garantizar un mantenimiento adecuado para evitar la degradación del sistema y asegurar su eficacia durante la vida útil del edificio. Tanto los aisladores sísmicos de base elastomérica como los de tipo deslizante ofrecen ventajas significativas en términos de protección contra eventos sísmicos en Colombia.

Contexto sísmico y geológico

Datos Geológicos y Sísmicos de las Zonas de Alta Sismicidad en Colombia

Se presenta una visión técnica detallada de las áreas de alta sismicidad en Colombia, con especial énfasis en los aspectos geológicos y sísmicos que influyen en la vulnerabilidad y el riesgo sísmico en estas regiones. La recopilación de información geológica y sísmica ofrece una comprensión integral de los factores que contribuyen a la actividad sísmica en el país.

La región del Eje Cafetero, ubicada en el centro de Colombia, destaca como una de las zonas más activas desde el punto de vista sísmico. Geológicamente, esta área está marcada por la presencia de la Falla Romeral, una estructura geológica importante que atraviesa la región y marca la zona de contacto entre la Cordillera Central y la Cordillera Occidental de los Andes colombianos. La geología local está dominada por rocas sedimentarias y volcánicas, con una historia geológica compleja que incluye actividad volcánica pasada.

La actividad sísmica en el Eje Cafetero ha sido significativa en el pasado, con eventos notables como el terremoto de Armenia de 1999, que alcanzó una magnitud de 6.2 en la escala de Richter. Esta actividad sísmica se atribuye a la interacción de las placas tectónicas de Nazca y Sudamericana, así como a la actividad intraplaca asociada con la tectónica local.

Por otro lado, la región del Pacífico colombiano y el departamento de Chocó son áreas conocidas por su alta actividad sísmica debido a su ubicación en la zona de subducción de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana. Geológicamente, estas áreas están influenciadas por la presencia de la Fosa de Colombia, una profunda depresión submarina a lo largo de la costa del Pacífico. Las rocas predominantes son de origen sedimentario, con formaciones marinas y terrestres. La actividad sísmica en el Pacífico y Chocó es principalmente de origen subducción, caracterizada por sismos de alta magnitud. El terremoto de Tumaco de 1979, con una magnitud de 8.0 en la escala de Richter, es un ejemplo destacado de la actividad sísmica significativa en esta región.

En conclusión, las zonas de alta sismicidad en Colombia, como el Eje Cafetero y el Pacífico-Chocó, presentan una combinación única de factores geológicos y tectónicos que contribuyen a la actividad sísmica en estas áreas. Comprender estos factores es fundamental para evaluar adecuadamente el riesgo sísmico y desarrollar medidas de mitigación efectivas que reduzcan la vulnerabilidad de las comunidades y la infraestructura ante posibles eventos sísmicos. A continuación, se presentan datos acerca del nivel de sismicidad que se presenta en el territorio colombiano. Ver figura 7

Mapa de amenaza sísmica en Colombia

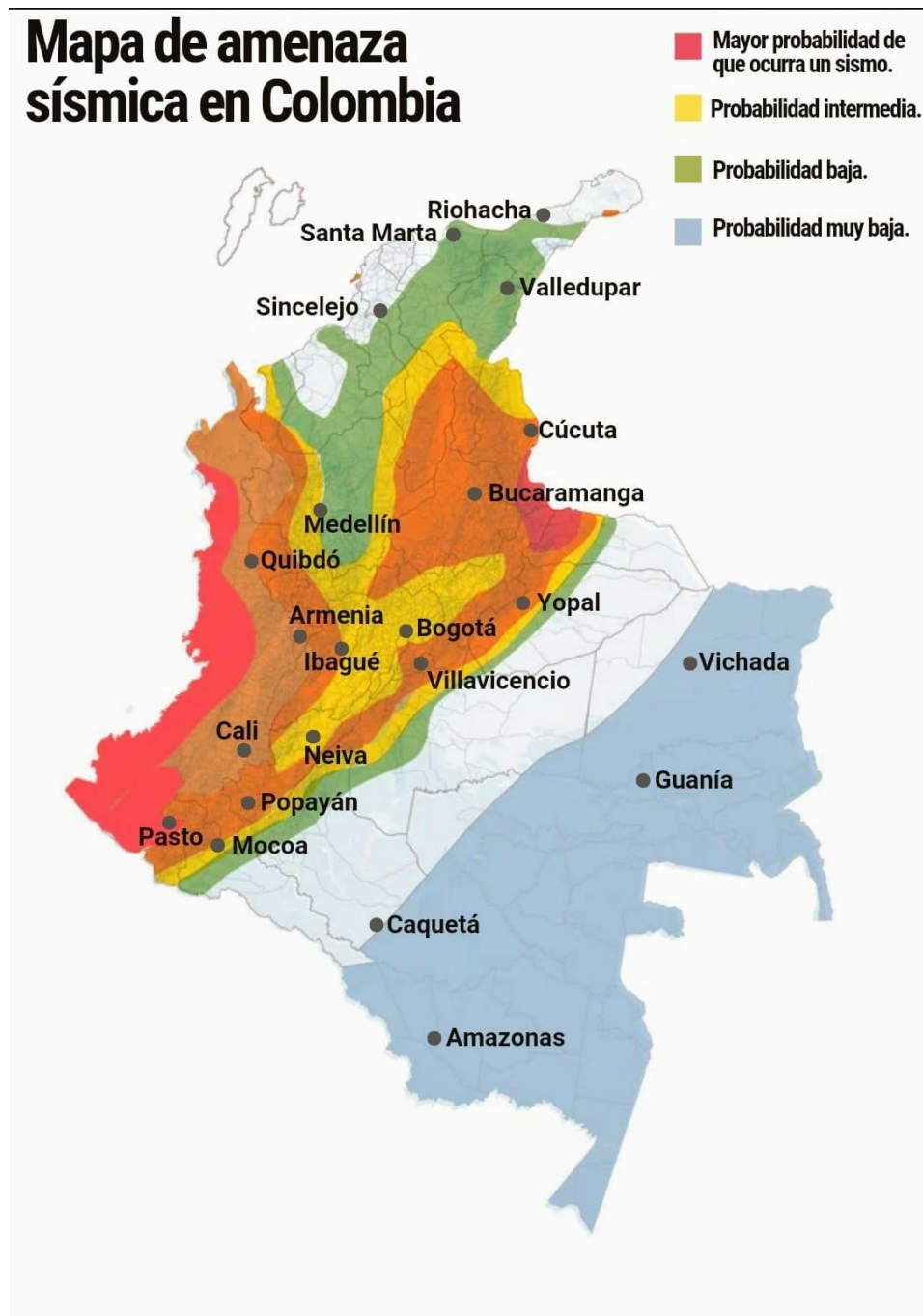


Figura 7. Mapa de amenaza sísmica en Colombia. Nota. Distribución geográfica de la amenaza sísmica en Colombia, basada en el análisis de datos sísmicos históricos, geología regional, y modelos de comportamiento tectónico (2023). Fuente: Boyacá Visible (2023).

Evaluación Geológica y Sísmica de Bogotá

En términos geológicos, Bogotá se asienta sobre el altiplano cundiboyacense, una región caracterizada por su compleja geología, influenciada por la tectónica de placas de los Andes. La ciudad está en una zona de transición entre la Cordillera Oriental y la Cordillera Central, lo que se refleja en una variada secuencia estratigráfica que abarca desde rocas precámbricas hasta formaciones del Cenozoico. Predominan las rocas sedimentarias, como areniscas y lutitas, depositadas durante el Mesozoico y el Cenozoico temprano, junto con depósitos volcánicos asociados con la actividad volcánica pasada en la región.

Desde el punto de vista sismológico, Bogotá se encuentra en una zona de bajo a moderado riesgo sísmico, pero aún está sujeta a la actividad sísmica residual debido a su ubicación en la intersección de placas tectónicas. La interacción entre la placa sudamericana y la placa de Nazca genera una sismicidad residual que se manifiesta en sismos de mediana o baja magnitud.

Los eventos sísmicos con incidencia en la ciudad de Bogotá son registrados a través de la red de acelerógrafos que administra la entidad; está conformada por estaciones ubicadas en diversos puntos de la ciudad. La Red de acelerógrafos es la encargada del registro de la actividad sísmica en la capital y permite identificar las zonas que han estado expuestas a las mayores aceleraciones y mejorar el conocimiento de la respuesta sísmica de los suelos. (IDIGER, 2024).

Aunque los terremotos más significativos generalmente ocurren en otras partes del país, la ciudad ha experimentado sismos locales, lo que subraya la necesidad de considerar el riesgo sísmico en la planificación y diseño de infraestructuras. A continuación, se presenta el mapa de la microzonificación de Bogotá.

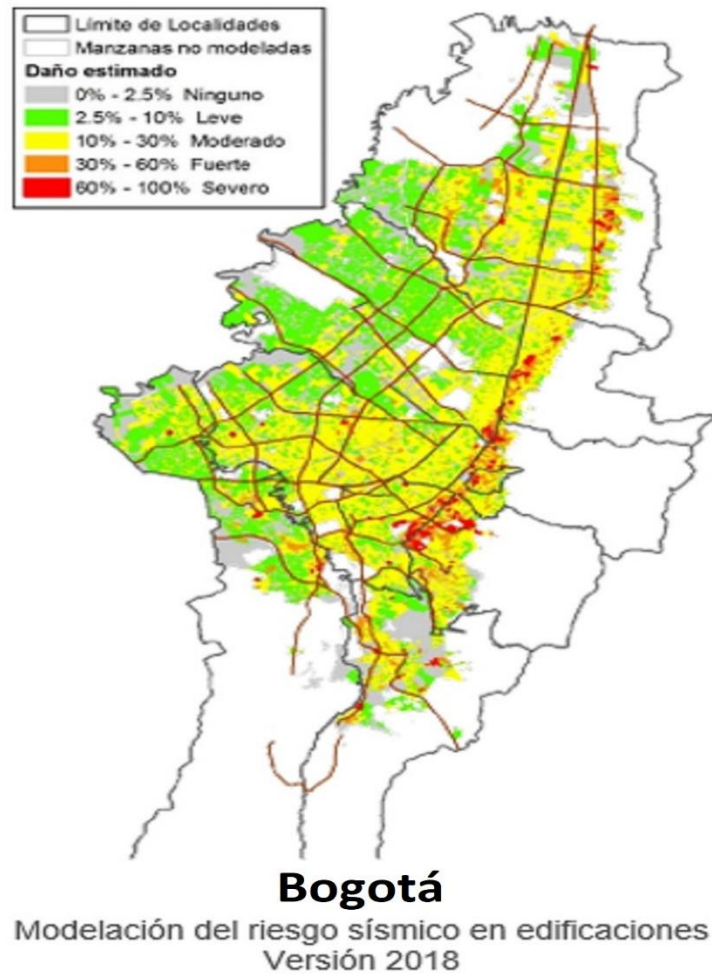


Figura 8. Mapa de Modelación de Riesgo Sísmico en Edificaciones de Bogotá. Nota. este mapa representa los niveles de riesgo sísmico en diferentes zonas de la ciudad. Las áreas coloreadas indican los niveles de amenaza sísmica, destacando las zonas con mayor probabilidad de sufrir daños significativos en caso de un terremoto. Fuente: IDIGER (2018).

Riesgo Sísmico en Bogotá: Contexto Histórico y Actual

Entre los sismos de mayor magnitud ocurridos en los últimos 50 años en Bogotá, se destacan los siguientes:

24 de diciembre de 2019: Bogotá se vio sorprendida por un sismo de magnitud 6,2 que tuvo su epicentro en la población de Mesetas, Meta. Aunque el impacto directo en la

ciudad fue moderado, se sintió en varias regiones del país, incluyendo Villavicencio y Cali. Este evento provocó evacuaciones preventivas en Bogotá, el cierre temporal de la vía al llano y daños estructurales en algunos edificios cercanos al epicentro. Afortunadamente, no se reportaron víctimas mortales, pero resaltó la vulnerabilidad de la ciudad frente a eventos sísmicos.

Este registro histórico de eventos sísmicos en Bogotá subraya la importancia de comprender y gestionar adecuadamente el riesgo sísmico en una ciudad tan densamente poblada y económicamente vital como la capital colombiana. A medida que la urbanización continúa su expansión y las edificaciones crecen en altura y complejidad, es crucial evaluar y fortalecer la resiliencia de la infraestructura urbana frente a posibles eventos sísmicos. Estos eventos pasados no solo son parte de la historia de la ciudad, sino también lecciones que deben guiar las políticas de planificación urbana y construcción de viviendas en el futuro.

Es crucial examinar detenidamente los recientes sismos que han afectado a la ciudad de Bogotá. En los últimos cinco años, hemos sido testigos de una serie de eventos sísmicos, algunos de los cuales han dejado un impacto significativo en la región. Uno de los aspectos más preocupantes es la presencia de una secuencia sísmica, como lo indican los sismos reportados en fechas consecutivas en zonas cercanas a Bogotá, como Cundinamarca y el Meta. Estos eventos, aunque de magnitudes moderadas, son indicativos de la actividad sísmica continua en la región, lo que subraya la importancia de fortalecer la infraestructura y adoptar medidas de mitigación del riesgo sísmico.

Es evidente que ciertas estructuras en Bogotá y sus alrededores han experimentado daños, incluso en sismos de magnitudes relativamente bajas. Este hecho pone de manifiesto la vulnerabilidad de nuestras edificaciones frente a eventos sísmicos, especialmente aquellas construcciones que no cuentan con medidas de protección adecuadas. Aquí es donde entra en juego la importancia de la implementación de aisladores sísmicos de base en las estructuras vulnerables. La instalación de aisladores sísmicos no solo aumentaría la resistencia y la seguridad estructural de los edificios en

Bogotá, sino que también proporcionaría una mayor tranquilidad a sus habitantes frente a la amenaza constante de sismos.

Además, la inversión en tecnologías de mitigación del riesgo sísmico como los aisladores sísmicos puede traducirse en ahorros significativos a largo plazo al minimizar los costos de reparación y reconstrucción después de un evento sísmico. Así mismo contribuir al desarrollo de la industria de la ingeniería sísmica en el país, promoviendo la innovación y el avance en los sistemas de aislamiento sísmico utilizados en Colombia.

Normativas y regulaciones locales

Colombia:

En Colombia, el marco normativo principal que aborda la implementación de aisladores sísmicos de base es el Código Colombiano de Construcción Sismo Resistente, conocido como NSR-10. Este código establece los requisitos para el diseño y la construcción de estructuras resistentes a los sismos en el país. Con enfoque en el Capítulo C, este código se dedica a las disposiciones de diseño sísmico, donde se especifican los criterios y parámetros a considerar para la protección de edificaciones frente a eventos sísmicos. Aunque no hay una norma regulatoria como tal que defina la correcta implementación técnica de los aisladores sísmicos de base. "Al no disponerse actualmente de una normativa propia para el país, el Reglamento Colombiano de Construcciones Sismo Resistentes (NSR-10) recomienda seguir las indicaciones de documentos americanos como ASCE 7 o FEMA 450" (Piscal-Arévalo & Francisco López-Almansa, 2018, p. 2).

La falta de una normativa específica en Colombia para la implementación de aislamiento sísmico ha llevado a que el Reglamento Colombiano de Construcciones Sismo Resistentes (NSR-10) recomiende recurrir a documentos de referencia internacionales. Estas guías provenientes de los Estados Unidos proporcionan directrices detalladas sobre el diseño y la construcción de estructuras sismo resistentes, incluyendo el uso de aisladores de base. Como resultado, los edificios que han sido diseñados y construidos hasta la fecha en Colombia con sistemas de aislamiento sísmico han seguido

los lineamientos establecidos en alguna de estas normativas extranjeras. Esto ha permitido avanzar en la implementación de tecnologías de protección contra sismos en el país, aprovechando el conocimiento y la experiencia desarrollados en otros lugares.

Sin embargo, es importante destacar que la adopción de una normativa extranjera sin un análisis exhaustivo de su aplicabilidad al contexto local puede acarrear serias inconsistencias técnicas y sobrecostos. Las condiciones geográficas, geotécnicas y de amenaza sísmica pueden variar significativamente entre diferentes regiones, lo que significa que una normativa diseñada para un entorno particular puede no ser completamente adecuada para otro.

Por lo tanto, es fundamental realizar estudios y evaluaciones detalladas para determinar la idoneidad y la adaptabilidad de las normativas extranjeras al contexto colombiano antes de su aplicación. Esto garantizará que las estructuras diseñadas con aislamiento sísmico cumplan con los estándares de seguridad y eficiencia requeridos, evitando así posibles errores costosos y retrasos en la expansión de esta tecnología en el país. La colaboración entre expertos locales e internacionales puede ser crucial en este proceso, permitiendo aprovechar la experiencia global mientras se adapta a las necesidades y condiciones específicas del territorio colombiano.

A nivel mundial:

A nivel internacional, la implementación de aisladores sísmicos de base está influenciada por una variedad de normativas y estándares desarrollados por organizaciones reconocidas en el campo de la ingeniería sísmica. Estas regulaciones y estándares, provenientes de diversas partes del mundo, reflejan décadas de investigación, desarrollo y experiencia acumulada en el diseño de estructuras resistentes a los sismos. Entre los principales marcos normativos y estándares que abordan la implementación de aisladores sísmicos se encuentran:

La American Society of Civil Engineers (ASCE) es una organización líder en ingeniería civil que establece estándares y guías técnicas para diversos aspectos de la disciplina, incluida la ingeniería sísmica en los Estados Unidos. Uno de sus documentos más influyentes es el ASCE 7, conocido como "Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures". Este estándar proporciona los requisitos mínimos de carga para el diseño estructural en edificaciones, abarcando una amplia gama de cargas, incluyendo las generadas por eventos sísmicos.

En el contexto de los aisladores sísmicos, el ASCE 7 ofrece criterios específicos para su aplicación en el diseño de estructuras. Estos criterios incluyen pautas detalladas para la selección adecuada de aisladores, métodos de análisis y diseño, integración con otros sistemas estructurales, así como requisitos de construcción y mantenimiento. El ASCE 7 se actualiza periódicamente para reflejar los últimos avances en investigación y práctica en ingeniería sísmica, garantizando que las estructuras diseñadas conforme a sus directrices estén alineadas con los estándares más recientes y las mejores prácticas de la industria.

El International Building Code (IBC) es una referencia clave en la ingeniería de estructuras a nivel global, siendo adoptado en numerosos países para regular la construcción sísmo resistente. Este código proporciona un marco integral para el diseño, la construcción y la seguridad de edificaciones, abordando una amplia gama de aspectos relacionados con la resistencia estructural.

El Capítulo 17 del IBC se dedica específicamente a los requisitos para el diseño y la construcción de estructuras sísmicas. Este capítulo establece criterios detallados para asegurar que las edificaciones sean capaces de resistir las fuerzas generadas por eventos sísmicos, minimizando así el riesgo de daños catastróficos. Entre las disposiciones incluidas en este capítulo se encuentran requisitos para la resistencia de materiales, sistemas de cimentación, diseño de sistemas estructurales y métodos de análisis sísmico. Dentro del marco del Capítulo 17 del IBC, se aborda específicamente el uso de

aisladores sísmicos como una estrategia efectiva para mitigar los efectos de los terremotos en las estructuras.

El Eurocódigo 8 es un conjunto de normas europeas ampliamente reconocido que proporciona directrices detalladas para el diseño sísmico de estructuras en países de la Unión Europea y en otros lugares. Esta serie de normas, desarrollada por el Comité Europeo de Normalización (CEN), aborda aspectos clave del diseño sísmico, desde la evaluación de la amenaza sísmica hasta la selección y aplicación de medidas de protección, incluyendo el uso de tecnologías de aislamiento sísmico como los aisladores de base.

Los países que utilizan el Eurocódigo 8 como referencia para el diseño sísmico, incluyendo la implementación de aisladores sísmicos, no se limitan exclusivamente a los miembros de la Unión Europea. Si bien estos países son los principales usuarios, el Eurocódigo 8 también es adoptado por naciones fuera de la UE que buscan estándares de diseño sísmico reconocidos internacionalmente y basados en la última investigación y práctica en ingeniería sísmica. Entre los países que emplean dicha norma para el diseño e implementación de aisladores se encuentran miembros de la Unión Europea como Alemania, Francia, Italia, España, entre otros. Además, algunos países no pertenecientes a la UE, como Suiza, Noruega, Islandia y Turquía, han optado también el Eurocódigo 8 como referencia para sus normativas de diseño sísmico.

La Japan Society of Civil Engineers (JSCE), desempeña un papel crucial en el desarrollo y la difusión de conocimientos en ingeniería civil. La alta actividad sísmica en Japón, con su historia de terremotos devastadores, ha impulsado a la JSCE a ser pionera en el desarrollo de estándares y pautas detalladas para el diseño y la implementación de aisladores sísmicos. Los estándares y pautas desarrollados por la JSCE son el resultado de décadas de investigación, pruebas en campo y lecciones aprendidas de eventos sísmicos pasados. Estas normativas se centran en proporcionar directrices claras y prácticas para el diseño, la selección, la instalación y el mantenimiento de aisladores

sísmicos en una amplia variedad de estructuras, desde edificios de múltiples pisos hasta puentes y estructuras industriales.

La norma internacional ISO 22762-1:2005 desarrollada por la Organización Internacional de Normalización (ISO), ofrece un marco detallado que abarca desde la especificación de requisitos de diseño hasta la evaluación de la calidad y la seguridad de estos dispositivos. La ISO 22762-1:2005 establece criterios precisos para el diseño de aisladores sísmicos, incluyendo aspectos como la resistencia estructural, la capacidad de deformación y la compatibilidad con otros componentes del sistema estructural.

La norma define procedimientos de prueba rigurosos para evaluar el rendimiento de los aisladores sísmicos en condiciones simuladas de terremotos. Estas pruebas pueden incluir ensayos de laboratorio para determinar la capacidad de carga, la capacidad de deformación y la resistencia a la fatiga de los aisladores, así como pruebas de campo en situaciones reales para validar su comportamiento bajo condiciones sísmicas reales. (Rui-jun Zhang & Ai-qun Li, 2020, p. 32).

Estas son solo algunas de las regulaciones y normativas que influyen en la implementación de aisladores sísmicos de base a nivel mundial. Es importante tener en cuenta que cada país puede tener sus propias regulaciones específicas, además de seguir las mejores prácticas internacionales para garantizar la seguridad y eficacia de estos dispositivos en la protección contra sismos.

Diseño Metodológico

El diseño metodológico propuesto para la investigación de la implementación de aisladores sísmicos de base en edificaciones de gran altura en Bogotá consta de varias etapas secuenciales, cada una de las cuales implica una serie de procedimientos específicos destinados a lograr los objetivos establecidos.

Etapas 1: Selección de Edificaciones

En esta primera fase, se llevará a cabo un exhaustivo proceso de selección de edificaciones que representen de manera adecuada el panorama constructivo de la ciudad de Bogotá. Se establecerán criterios de selección basados en la antigüedad de las edificaciones, su altura, la zona geográfica en la que se ubican, la tipología estructural y la disponibilidad de información técnica relevante. Se realizará un mapeo de la edificación para el desarrollo del estudio.

Etapas 2: Recopilación de Datos

Una vez seleccionada la edificación, se procederá a recopilar una amplia gama de datos relacionados con su diseño, construcción y comportamiento estructural. Esto incluirá la obtención de planos arquitectónicos y estructurales, especificaciones de diseño, detalles de construcción, registros de mantenimiento y cualquier otra documentación técnica disponible. Además, se llevará a cabo un análisis exhaustivo de la sismicidad histórica y actual en Bogotá y sus alrededores. Se recopilarán datos sobre eventos sísmicos pasados, su magnitud, intensidad y efectos en las estructuras urbanas. Se revisarán los registros sísmicos disponibles y se analizarán las normativas y regulaciones vigentes en materia de construcción sísmica en Colombia.

Etapas 3: Análisis y Evaluación

En esta etapa se realizará un análisis detallado de la edificación seleccionada utilizando herramientas de modelado y simulación estructural avanzadas. Se desarrollarán modelos computacionales precisos de las estructuras y se aplicarán cargas sísmicas simuladas y reales para evaluar su comportamiento dinámico. Se analizarán los modos de vibración, las deformaciones, los desplazamientos y las fuerzas internas generadas en las estructuras durante eventos sísmicos.

Además, se llevará a cabo una comparación detallada del desempeño estructural del edificio con aisladores sísmicos de base y aquellos con estructuras fijas. Se evaluará la capacidad de disipación de energía de los aisladores sísmicos, su efectividad para

reducir las fuerzas sísmicas transmitidas a la superestructura y su impacto en la seguridad estructural y la integridad del edificio en su conjunto.

Etapas 4: Conclusiones y Recomendaciones

Basándose en los resultados del análisis y la evaluación, se elaborarán conclusiones fundamentadas que resuman los hallazgos clave de la investigación. Se identificarán las principales ventajas y desventajas de la implementación de aisladores sísmicos de base en edificaciones de gran altura en Bogotá, así como las implicaciones prácticas para el diseño, la construcción y el mantenimiento de este tipo de estructuras en el futuro.

Asimismo, se formularán recomendaciones específicas dirigidas a profesionales del sector de la construcción, autoridades gubernamentales, organismos reguladores y otros actores relevantes. Estas recomendaciones abordarán aspectos relacionados con la adopción de prácticas de diseño sísmico avanzadas, la actualización de normativas y códigos de construcción, la promoción de tecnologías innovadoras y la sensibilización sobre la importancia de la preparación para sismos en entornos urbanos vulnerables.

Etapas 5: Documentación y Presentación

Finalmente, se redactará un informe detallado que documente todos los aspectos de la investigación, desde la selección de edificaciones hasta las conclusiones y recomendaciones finales. El informe se someterá a revisión por pares para garantizar su rigor científico y su calidad académica. Además, se preparará una presentación visual de los resultados y se organizará una defensa oral ante un comité evaluador compuesto por expertos en el campo de la ingeniería. Esta presentación servirá como plataforma para discutir los hallazgos de la investigación, responder preguntas y recibir comentarios y sugerencias para futuras investigaciones.

Edificación de estudio

El proyecto constructivo denominado "Aralia de Castilla", presenta una serie de características específicas que guían su diseño y construcción. Se contempla la edificación con una altura de doce pisos sobre el nivel del suelo, así como áreas de sótano y plataformas adicionales que complementan la estructura. Estas áreas subterráneas y de nivel ofrecen espacio adicional para diversos fines, como estacionamiento o servicios técnicos.

Para garantizar la estabilidad y la resistencia estructural del edificio, las cargas de los edificios se transmiten hacia el nivel de fundación a través de muros de concreto dispuestos estratégicamente, con una separación máxima de 3 metros entre ellos. Esta disposición permite distribuir uniformemente las cargas y minimizar los esfuerzos sobre cada elemento estructural.

Inicialmente, se estima que el peso de los edificios, en su área de proyección, será de 12 toneladas por metro cuadrado (12 T/m^2), lo que resulta en cargas máximas de hasta 36 toneladas por metro lineal (36 T/m) en los muros de contención. Este cálculo de carga es fundamental para dimensionar adecuadamente los elementos estructurales y garantizar su capacidad para soportar las fuerzas aplicadas.

Por otro lado, las plataformas del proyecto Aralia de Castilla estarán construidas con una estructura convencional de concreto reforzado, con luces entre columnas que no excederán los 8 metros de longitud. Esta disposición proporciona la rigidez necesaria para soportar cargas y permite una distribución eficiente de las fuerzas a lo largo de la estructura. En cuanto a las cargas en pedestal en el área de las plataformas, se estima que alcanzarán valores máximos de 50 toneladas. Estas cargas se consideran al diseñar los cimientos y la estructura de soporte para garantizar una adecuada capacidad de carga y estabilidad del conjunto.

En resumen, las características del proyecto incluyen una cuidadosa planificación de la distribución de cargas, el dimensionamiento adecuado de los elementos estructurales y el uso de materiales y técnicas de construcción que aseguren la seguridad y la estabilidad de las edificaciones. Este enfoque integral garantiza la viabilidad y la eficacia del proyecto en su conjunto.

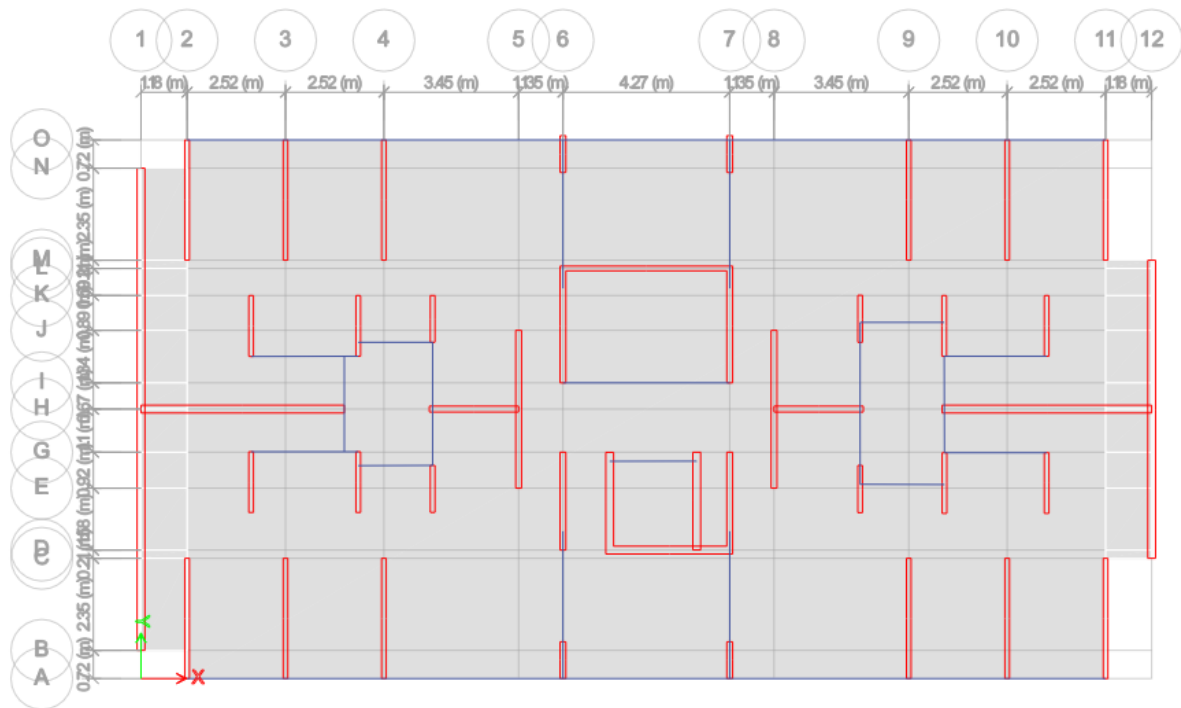


Figura 9. Modelo estructural del edificio de estudio visto en planta. Fuente: Elaboración propia.

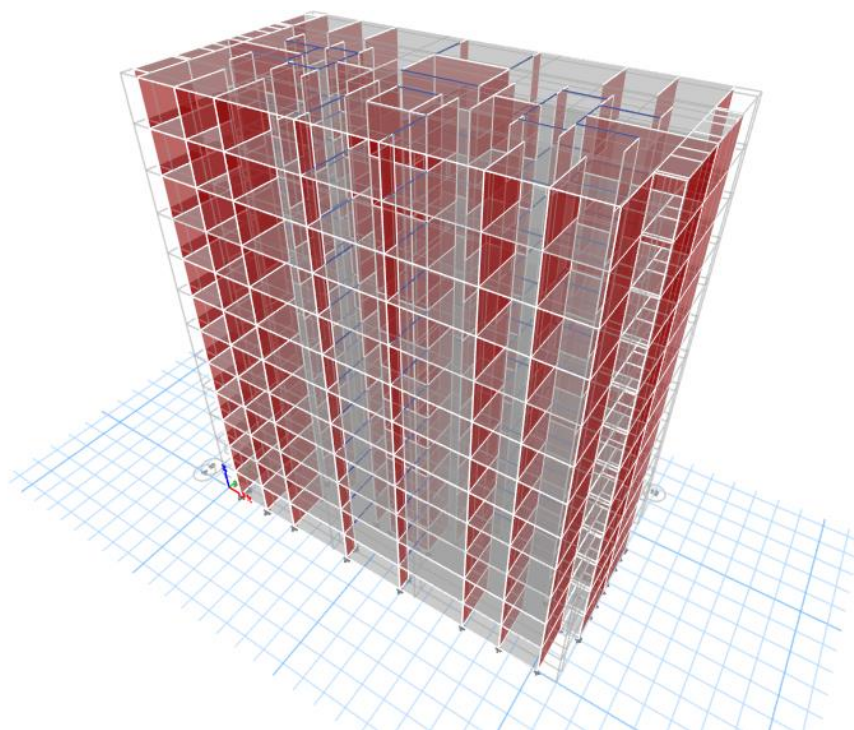


Figura 10. Modelo estructural del edificio visto en alzado. Fuente: Elaboración propia.

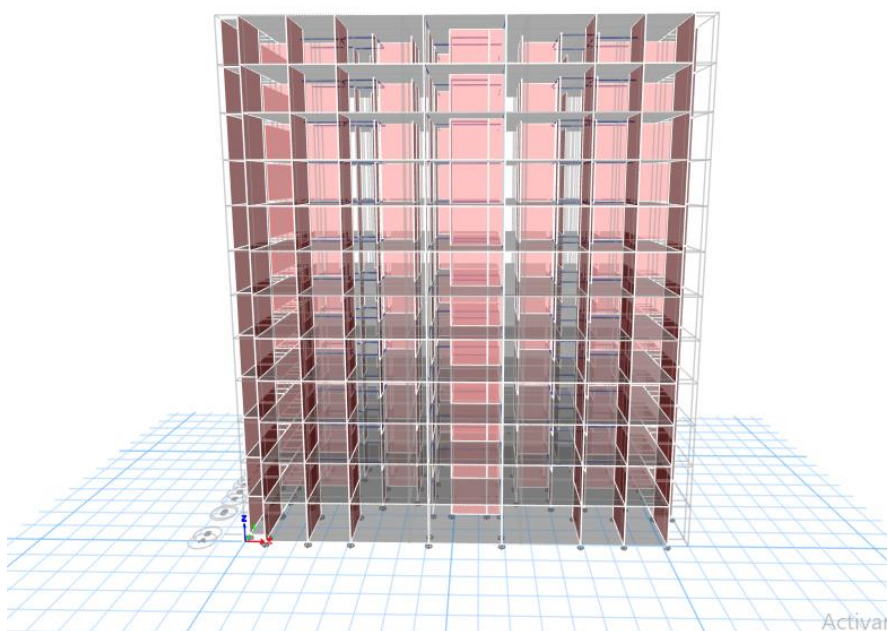


Figura 11. Modelo estructural del edificio visto en alzado. Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a la exploración del subsuelo, se realizaron diez perforaciones que alcanzaron profundidades entre 6 y 40 metros bajo la superficie. Estas perforaciones permitieron obtener un panorama detallado de las condiciones del subsuelo en el sitio del proyecto. Se encontraron variaciones significativas en la estratigrafía, con presencia de diferentes tipos de suelos a distintas profundidades. La exploración se complementó con ensayos de veleta de corte de campo y ensayos de resistencia a la penetración estándar (SPT), los cuales proporcionaron información valiosa sobre las propiedades mecánicas de los materiales. Se obtuvieron muestras remoldeadas y muestras inalteradas en tubos Shelby, las cuales fueron sometidas a diversos ensayos de laboratorio, incluyendo ensayos de consolidación, compresión inconfiada y clasificación. Estos ensayos permitieron caracterizar de manera precisa los diferentes estratos encontrados y determinar sus parámetros geotécnicos relevantes.

Perfil estratigráfico

El estudio de suelos realizado en el sitio del proyecto reveló un perfil estratigráfico compuesto por múltiples capas de diferentes materiales. En la parte más superficial, se identificó una capa de rellenos arcillosos con espesores que no superaban los 0.4 metros. Estos rellenos probablemente se colocaron durante trabajos previos de nivelación y acondicionamiento del terreno.

Subyacente a esta capa de rellenos, se encontró un depósito natural de arcilla limosa de consistencia blanda a muy blanda, de color gris verdoso, que contenía pequeñas cantidades de arena fina y presentaba contenidos de humedad elevados. Este estrato arcilloso blando se extendía hasta profundidades que oscilaban entre los 6 y los 10 metros aproximadamente.

Por debajo de la capa de arcilla limosa blanda, el perfil mostraba la presencia de un depósito de arena fina a media, de compacidad que variaba de medianamente densa a densa, de color gris claro, con contenidos de humedad relativamente bajos. Esta formación arenosa continuaba hasta alcanzar profundidades cercanas a los 20 metros. A mayores profundidades, entre los 20 y 35 metros aproximadamente, se identificó una capa de arcilla limosa de consistencia media a rígida, de color gris verdoso oscuro, con

características plásticas y presencia de pequeñas cantidades de arena fina y gravilla dispersa.

Finalmente, a partir de los 35 metros de profundidad y hasta donde alcanzaron las perforaciones, el perfil estratigráfico estaba conformado por un depósito de grava arenosa de compacidad muy densa a densa, de color gris claro, con contenidos de humedad bajos. El perfil estratigráfico revelado por la exploración del subsuelo presentaba una secuencia que iniciaba con rellenos superficiales y arcillas limosas blandas, seguida por un estrato de arenas densas, una capa de arcillas limosas de mayor consistencia, y finalmente gravas arenosas muy densas en las capas más profundas.

Cimentación

De acuerdo al análisis geotécnico realizado, para los edificios con sótano y doce pisos de altura se recomienda implementar una cimentación profunda mediante pilotes pre-excavados y fundidos in situ o pilotes de tornillo continuo. Estos pilotes deberán tener un diámetro mínimo de 50 cm y deberán ser empotrados al menos 5 metros dentro del estrato de arcilla limosa rígida que se encuentra entre los 20 y 35 metros de profundidad. Se estima que estos pilotes podrán soportar cargas admisibles de hasta 60 toneladas, con asentamientos totales inferiores a 2.5 cm bajo dichas cargas.

Descripción de la estructura

El proyecto consiste en una torre de 12 pisos, con un sótano, una cubierta y un cuarto de máquinas, diseñados para satisfacer las necesidades estructurales y funcionales del edificio. A continuación, se detallan las características técnicas de la estructura:

Número de pisos:

La estructura comprende un total de 13 niveles, incluyendo un sótano y cubiertas técnicas. Cada nivel está diseñado para soportar las cargas previstas y proporcionar estabilidad y seguridad a los ocupantes del edificio.

Cimentación:

El sistema de cimentación utilizado es una combinación de placa y pilotes. Esta cimentación combinada está diseñada para distribuir las cargas de manera eficiente:

Placa: La placa de cimentación es maciza y tiene un espesor de 0.20 metros. Esta placa soporta aproximadamente el 40% de las cargas totales del edificio.

Vigas descolgadas: Las vigas descolgadas tienen una altura de 1.00 metro, lo que proporciona rigidez adicional a la placa de cimentación.

Pilotes:

Los pilotes tienen un diámetro de 30 centímetros y una longitud de 25 metros bajo el nivel del andén de la calle 6C, soportando el 60% restante de las cargas. Este sistema de pilotes profundos asegura una transferencia adecuada de cargas al suelo, aumentando la estabilidad de la estructura.

Sistema de resistencia sísmica:

La estructura está equipada con muros de carga de concreto reforzado, diseñados con una capacidad moderada de disipación de energía (DMO). Este sistema de muros de carga proporciona una resistencia adecuada contra fuerzas sísmicas, protegiendo la integridad del edificio durante eventos sísmicos.

Sistema de entrepiso:

Las losas entrepiso son macizas y tienen un espesor de 0.10 metros en la mayoría de las áreas. En sectores específicos, el espesor de las losas es de 0.12 metros para proporcionar resistencia adicional donde se requiere:

Viguetas descolgadas:

Las viguetas descolgadas tienen una altura de 30 centímetros o 20 centímetros, según las necesidades de carga y diseño del entrepiso. Estas viguetas ayudan a distribuir las cargas y a proporcionar soporte adicional a las losas.

Cubierta:

La cubierta del edificio utiliza dos sistemas distintos para satisfacer diferentes necesidades de carga y diseño:

Placa maciza:

En áreas principales, la cubierta es una placa maciza con un espesor de 0.10 metros. En sectores específicos, el espesor aumenta a 0.12 metros para soportar cargas adicionales.

Viguetas descolgadas:

Similar al sistema de entrepiso, las viguetas descolgadas en la cubierta tienen una altura de 30 centímetros o 20 centímetros, proporcionando soporte y rigidez adicional.

Cubierta liviana:

En áreas donde se requiere un menor peso, se utiliza un sistema de cubierta liviana para reducir las cargas totales sobre la estructura.

Enfoque tradicional de diseño de edificaciones conforme al reglamento colombiano de construcción sismo resistente (NSR-10)

El apéndice I de la NSR-10 detalla un procedimiento de diseño que describe las distintas etapas involucradas en el proceso de análisis y diseño de edificaciones de la siguiente manera en la que será llevado a cabo el proyecto y posteriormente el análisis de la implementación de los aisladores sísmicos de base. Según Gonzalez Gordon (2020), se presenta una descripción detallada y secuencial de las etapas clave involucradas en el

proceso de análisis y diseño de edificaciones, conforme a las directrices establecidas en la NSR-10.

Paso 1: Determinación de la localización geográfica específica del proyecto, evaluación del nivel de amenaza sísmica asociado, y cálculo preciso de los coeficientes de aceleración y velocidad pico efectiva (A_a y A_v) de acuerdo con la zonificación sísmica establecida para el área de estudio.

Localización:

La estructura se encuentra localizado en la Calle 6C N° 81A – 91/75 de la ciudad de Bogotá.

Definición de tipo de suelo:

Según la norma NSR-10 el suelo se puede clasificar como tipo F

Perfil de Suelo de la Microzonificación de Bogotá de 2010

Zona - ALUVIAL 300

Zona de amenaza sísmica:

La edificación está localizada en una zona de amenaza sísmica INTERMEDIA

Ciudad	A_a	A_v	Zona de Amenaza Sísmica
Arauca	0.15	0.15	Intermedia
Armenia	0.25	0.25	Alta
Barranquilla	0.10	0.10	Baja
Bogotá D. C.	0.15	0.20	Intermedia
Bucaramanga	0.25	0.25	Alta
Cali	0.25	0.25	Alta
Cartagena	0.10	0.10	Baja
Cúcuta	0.35	0.30	Alta
Florencia	0.20	0.15	Intermedia
Ibagué	0.20	0.20	Intermedia
Leticia	0.05	0.05	Baja
Manizales	0.25	0.25	Alta
Medellín	0.15	0.20	Intermedia
Mitú	0.05	0.05	Baja
Mocoa	0.30	0.25	Alta
Montería	0.10	0.15	Intermedia
Neiva	0.25	0.25	Alta
Pasto	0.25	0.25	Alta
Pereira	0.25	0.25	Alta

Tabla 2. Valores de A_a y A_v según las regiones de los mapas de las figuras A.2.3-2 y A.2.3-3.

Fuente: SCG (2009).

$$A_a = 0.15 \text{ y } A_v = 0.20$$

Paso 2:

Definición de los movimientos sísmicos de diseño. En este paso se tiene en cuenta el valor de la aceleración pico efectiva (A_a), velocidad pico efectiva (A_v), coeficientes de sitio (F_a) y (F_v), coeficiente de importancia (I) y de esta manera se obtiene el espectro elástico de aceleraciones, que viene a ser el parámetro inicial a la hora de realizar el análisis y diseño de la edificación.

Tipo de Perfil	Intensidad de los movimientos sísmicos				
	$A_a \leq 0.1$	$A_a = 0.2$	$A_a = 0.3$	$A_a = 0.4$	$A_a \geq 0.5$
A	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
B	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
C	1.2	1.2	1.1	1.0	1.0
D	1.6	1.4	1.2	1.1	1.0
E	2.5	1.7	1.2	0.9	0.9
F	véase nota	véase nota	véase nota	Véase nota	véase nota

Tabla 3. Valores del coeficiente F_a para la zona de periodos cortos del espectro (Nota. Adaptado de Modelación del riesgo sísmico en Bogotá D.C., por IDIGER, 2020, p.11.) IDIGER 2018.

Tipo de Perfil	Intensidad de los movimientos sísmicos				
	$A_v \leq 0.1$	$A_v = 0.2$	$A_v = 0.3$	$A_v = 0.4$	$A_v \geq 0.5$
A	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
B	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
C	1.7	1.6	1.5	1.4	1.3
D	2.4	2.0	1.8	1.6	1.5
E	3.5	3.2	2.8	2.4	2.4
F	véase nota	véase nota	véase nota	Véase nota	véase nota

Tabla 2. Valor del coeficiente F_v para la zona de periodos intermedios del espectro (Nota. Adaptado de Modelación del riesgo sísmico en Bogotá D.C., por IDIGER, 2020, p.11.) IDIGER 2018.

Debido a que el tipo de suelo de la zona donde se ubica la estructura es de tipo F, los valores para F_a y F_v , son extraídos del informe de estudio de suelos realizado:

$$F_a = 0.95 \text{ y } F_v = 2.10$$

I = Coeficiente de importancia

$$I = 1$$

(Debido a que es una estructura aislada sísmicamente)

Paso 3:

Determinación de las características estructurales y selección de los materiales de construcción. En esta fase, es crucial elegir el sistema estructural adecuado, el cual puede ser un sistema de muros de carga, un sistema combinado, un sistema aporticado, o un sistema dual. Adicionalmente, se debe seleccionar el material estructural más apropiado, ya sea concreto estructural, mampostería estructural, acero, madera o guadua. También es fundamental evaluar la capacidad de disipación de energía del sistema estructural dentro del rango elástico, clasificándola en capacidad especial de disipación de energía (DES), capacidad moderada de disipación de energía (DMO), o capacidad mínima de disipación de energía (DMI). Esta evaluación debe considerar las limitaciones impuestas por la normativa sobre el uso de sistemas y materiales estructurales en función de la zona de actividad sísmica, que puede ser categorizada como alta, intermedia o baja. Este análisis integral asegura que la estructura propuesta no solo cumple con los estándares de seguridad y desempeño, sino que también optimiza la resistencia y durabilidad frente a los eventos sísmicos específicos de la región.

El diseño estructural incorpora un sistema de muros en concreto reforzado, complementado con disipadores de energía DMO (Capacidad Moderada de Disipación de Energía). Este enfoque asegura una resistencia adecuada contra fuerzas sísmicas al distribuir eficientemente las cargas y permitir deformaciones controladas durante eventos sísmicos. Cumple con las normativas de construcción sismo-resistente colombianas, garantizando la seguridad estructural y la mitigación de daños en condiciones sísmicas severas.

El valor de coeficiente básico de disipación de energía R_0 para DMO es igual a 4

Paso 4:

Evaluación de la irregularidad estructural y selección del procedimiento de análisis. En esta etapa, es fundamental realizar una evaluación exhaustiva para identificar la presencia de irregularidades en la planta y el alzado de la estructura, así como posibles efectos adversos derivados de la falta de redundancia. Este análisis es esencial para

determinar el coeficiente de reducción de la capacidad de disipación de energía (R) del sistema estructural seleccionado. Además, se debe establecer el procedimiento de análisis adecuado, eligiendo entre varios métodos: un método de análisis lineal estático, como el método de la fuerza horizontal equivalente (FHE - ELM); un método de análisis lineal dinámico, como el análisis dinámico espectral (ADE - RSM); o un método de análisis dinámico no lineal, como el análisis contra el tiempo (ADC - NLTHA) o Time History. La elección del procedimiento de análisis debe basarse en la complejidad de la estructura, la presencia de irregularidades, y los requisitos normativos específicos, garantizando así una evaluación precisa y un diseño optimizado para resistir los eventos sísmicos previstos.

Irregularidades

Irregularidad en altura tipo 5Aa:

$$\Phi_a = 0.90 \quad \Phi_p = 1.00 \quad \Phi_r = 1.00$$

Ningún Piso tiene una rigidez lateral menor que el 80% de la del piso superior ni menor que el 70% de la rigidez lateral promedio de los tres pisos por encima. La estructura es regular para efectos de irregularidad de rigidez por piso flexible tipos 1aA o 1bA

Verificación irregularidad torsional 1aP Y 1bP:

La máxima deriva de un extremo es 1.20 veces la deriva promedio y menor que 1.2 veces la deriva promedio. La edificación es regular para efectos de irregularidad torsional tipos 1aP o 1bP

Verificación irregularidad desplazamiento del plano de acción de elementos verticales 4P:

- No hay ejes de columna que se suspendan antes de llegar a la Base
- No hay muros que se suspendan antes de llegar a la Base
- No hay desplazamiento del plano de acción de elementos verticales
- La edificación es REGULAR para efectos de irregularidad Tipo 4P

Verificación irregularidad piso flexible 1aA & 1bA:

Ningún Piso tiene una rigidez lateral menor que el 80% de la del piso superior ni menor que el 70% de la rigidez lateral promedio de los tres pisos por encima. la estructura es regular para efectos de irregularidad de rigidez por piso flexible tipos 1aA o 1Ba

Verificación desplazamiento dentro del plano de acción - 4A

Ninguna columna esta desplazada más que la dimensión correspondiente de la columna del piso inmediatamente debajo de la estructura es regular para efectos de Irregularidad Geométrica Tipo 4A

Hay un piso cuya Masa es 11.81 veces la del piso contiguo, mayor de 1.50 veces. La edificación tiene una irregularidad en la distribución de masas Tipo 2A

Hay un piso cuya dimensión horizontal del sistema de resistencia sísmica es 2.54 veces la del piso contiguo, mayor de 1.30 veces. la edificación tiene una irregularidad geométrica Tipo 3A.

Valor del Coeficiente de Modificación de Respuesta

$$R = \Phi_a \times \Phi_p \times \Phi_r \times R_o \quad \text{Ecuación (1)}$$

$$R = (0.9) * (1.0) * (1.0) = 3.6$$

$$\text{Dirección X -- } R_x = 3.6$$

$$\text{Dirección Y -- } R_y = 3.6 \text{ Para}$$

$$\text{Análisis Dinámico -- } R = 3.600$$

Sin embargo, la norma limita el valor a 2, por lo que para este caso el RI utilizado es de 2.

Paso 5:

Determinación de las fuerzas sísmicas de diseño. En esta fase, se calculan las fuerzas sísmicas actuantes sobre la estructura considerando sus parámetros dinámicos fundamentales. Primero, se evalúa la rigidez (K) y la masa (M) de la estructura para determinar su periodo de vibración fundamental (T). A continuación, se utiliza este periodo para obtener el valor del espectro elástico de aceleración (S_a), el cual se expresa como una fracción de la aceleración debida a la gravedad (g) para un coeficiente de amortiguamiento crítico del 5%. Este valor de (S_a) es esencial para el cálculo del cortante sísmico en la base (V_s) de la estructura, que representa la suma de todas las fuerzas sísmicas horizontales que actúan en la base de la edificación. Este análisis detallado y riguroso garantiza que las fuerzas sísmicas de diseño reflejen con precisión la respuesta dinámica de la estructura bajo las condiciones sísmicas esperadas, proporcionando una base sólida para el diseño estructural seguro y eficiente.

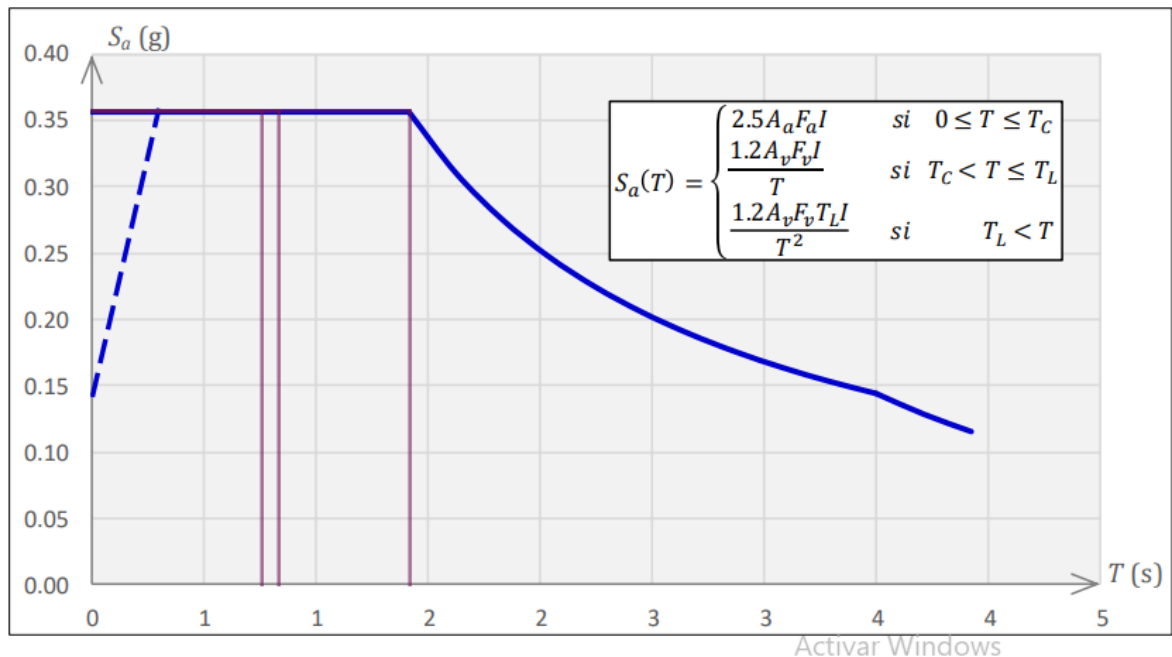


Figura 12. Parámetros iniciales de la estructura, espectro de aceleraciones. Fuente: Elaboración propia.

Paso 6:

Análisis de la estructura mediante el programa de cálculo deseado.

Paso 7:

Determinación de los desplazamientos horizontales.

Paso 8:

Verificación de derivas laterales. Es crucial realizar una evaluación exhaustiva de las derivas laterales de la estructura para asegurar el cumplimiento de los límites permisibles establecidos por el código colombiano. Según la normativa, la deriva lateral admisible para estructuras construidas con mampostería estructural es de 0.5% de la altura de entrepiso, mientras que, para estructuras realizadas con otros materiales estructurales, como concreto, acero, madera o guadua, el límite se establece en 1%. Esta verificación implica calcular los desplazamientos laterales inducidos por las fuerzas sísmicas y comparar estos valores con los límites normativos. El objetivo es garantizar que las deformaciones se mantengan dentro de los rangos aceptables para evitar daños excesivos en elementos no estructurales y asegurar la integridad y seguridad global de la edificación bajo cargas sísmicas.

Paso 9:

Diseño de elementos estructurales. En esta fase, conforme a la normativa colombiana, el diseño se lleva a cabo utilizando la fuerza sísmica ajustada por el coeficiente de capacidad de disipación de energía del sistema estructural (R). El coeficiente inicial de capacidad de disipación de energía (R_0) se determina consultando la tabla A.3-1 del reglamento NSR-10. Posteriormente, este coeficiente (R_0) se ajusta multiplicándolo por los coeficientes de reducción correspondientes a los diferentes tipos de irregularidades presentes en la estructura. Estos coeficientes de reducción consideran variaciones como irregularidades en planta, alzado o ausencia de redundancia, entre otros aspectos. El objetivo es optimizar el diseño estructural para resistir de manera eficaz las fuerzas sísmicas esperadas, asegurando al mismo tiempo la conformidad con los estándares de seguridad y desempeño establecidos por la normativa sísmica colombiana.

Paso 10:

Diseño de cimentación, considerando los factores de seguridad para cargas de servicio ($D+L$) y cargas sísmicas ($D+L+0.7E$). En este proceso, la variable (D) representa las cargas muertas, la variable (L) corresponde a las cargas vivas, y la variable (E) denota la fuerza sísmica de diseño. Se aplican factores de seguridad adecuados para garantizar la resistencia y estabilidad de la cimentación frente a las diferentes combinaciones de cargas mencionadas. La inclusión de la fuerza sísmica (E) en las combinaciones de diseño es esencial para asegurar que la cimentación sea capaz de soportar tanto las cargas estáticas como las dinámicas inducidas por eventos sísmicos, cumpliendo así con los requerimientos de seguridad y durabilidad establecidos por la normativa vigente.

Paso 11:

Diseño de elementos no estructurales.

Paso 12:

Revisión de los diseños por parte de la curaduría urbana, la autoridad municipal de planeación, o el ente de control competente. Este proceso implica la evaluación detallada y la aprobación de los planos y documentos técnicos por parte de las entidades responsables de asegurar el cumplimiento normativo y la adecuación urbanística de las estructuras propuestas. Es crucial que los diseños cumplan con todas las normativas locales y requisitos específicos de construcción para garantizar la seguridad estructural, funcional y estética de las edificaciones dentro del contexto urbano. La revisión por parte de estos entes asegura que los proyectos arquitectónicos y estructurales se ajusten plenamente a las regulaciones vigentes y contribuyan de manera positiva al desarrollo urbano sostenible y seguro.

Paso 13:

Ejecución constructiva y supervisión técnica del proyecto. Esta fase abarca la implementación efectiva de los planes y especificaciones técnicas aprobadas, asegurando la correcta ejecución de todos los procesos constructivos y el cumplimiento estricto de los estándares de calidad y seguridad establecidos. La supervisión técnica

incluye la inspección continua de los trabajos realizados, la gestión de la logística y la coordinación de los recursos, así como la verificación del cumplimiento de las normativas aplicables y las especificaciones técnicas. Esta etapa garantiza que la construcción se lleve a cabo de manera eficiente y segura, minimizando riesgos y asegurando la entrega de una estructura final que cumpla con los más altos estándares de rendimiento y durabilidad.

El procedimiento descrito anteriormente es un método riguroso ampliamente aplicado en diversas edificaciones colombianas. No obstante, el incremento en la altura de los edificios en los últimos años, junto con conceptos como el diseño de planta libre y formas arquitectónicas complejas, ha dado lugar a estructuras que son demasiado rígidas para cumplir con los requisitos de deriva. Esto ha generado proyectos que se vuelven inviables desde las etapas iniciales de diseño, especialmente en casos donde edificios esenciales como hospitales y universidades, debido a su categorización de uso, requieren un incremento significativo, hasta un 50%, en el espectro de diseño. Esto conlleva a la necesidad de incorporar una cantidad excesiva de muros estructurales. Además, aunque el procedimiento permite cierto grado de daño, es importante considerar estas limitaciones durante la planificación y ejecución del proyecto

Código para el diseño de estructuras aisladas sísmicamente de Estados Unidos (ASCE-7-16)

La normativa colombiana orienta hacia la norma ASCE 7-16 estadounidense para el diseño de sistemas de aislamiento sísmico debido a varias razones técnicas y normativas fundamentales. La ASCE 7-16 es reconocida globalmente como una referencia robusta en diseño estructural para zonas sísmicas, integrando investigaciones avanzadas y prácticas recomendadas basadas en experiencias significativas. Proporciona criterios actualizados y avanzados para estructuras bajo cargas sísmicas, incluyendo métodos de análisis sísmico, espectros de respuesta y consideraciones detalladas sobre

comportamiento de materiales y sistemas. Además, su uso promueve la compatibilidad con estándares internacionales, facilitando la colaboración en proyectos multinacionales y la adopción de prácticas comunes. Aunque es una norma estadounidense, la ASCE 7-16 es adaptable a condiciones locales colombianas, incorporando factores geotécnicos, climáticos y constructivos específicos del país. Su revisión periódica garantiza que los diseños sean actuales y alineados con los últimos avances en ingeniería sísmica, asegurando estructuras más seguras y resilientes ante eventos sísmicos.

En el diseño de estructuras aisladas sísmicamente, el código establece inicialmente que el coeficiente de importancia puede fijarse en 1, independientemente del grupo de uso asignado a la estructura (ASCE-7-16, p.168). Esta disposición permite simplificar los requisitos específicos para estructuras críticas como hospitales y universidades, razón por la cual este sistema ha sido ampliamente adoptado en este tipo de construcciones en Colombia hasta la fecha. Posteriormente, el código detalla los criterios para la selección de los diversos métodos de análisis estructural para estructuras aisladas, identificando los procedimientos permitidos como el método de fuerza horizontal equivalente (ELFM) y los enfoques dinámicos tanto lineales, como el análisis dinámico espectral (RSM), así como los métodos no lineales, como el análisis temporal (NLTHA) (Time History) (ASCE-7-16, p.172).

En este apartado se presentan los requisitos detallados para la aplicación del procedimiento de análisis por fuerza horizontal equivalente (ELFM) en estructuras aisladas sísmicamente, de acuerdo con las especificaciones de la norma ASCE 7-16. Este método es crucial para evaluar y diseñar sistemas de aislamiento sísmico, garantizando su eficacia y seguridad bajo condiciones sísmicas severas.

El análisis por ELFM requiere la consideración de diversos parámetros críticos, tales como:

Desplazamiento Máximo (DM):

Cálculo del desplazamiento lateral máximo que experimentará la estructura bajo cargas sísmicas de diseño.

Periodo Efectivo para el Desplazamiento Máximo (TM):

Determinación del periodo de vibración asociado al desplazamiento máximo, esencial para la caracterización dinámica de la estructura.

Desplazamiento Total Máximo (DTM):

Este parámetro incluye el desplazamiento adicional debido a la torsión accidental y excentricidad, proporcionando una evaluación completa del movimiento lateral máximo.

Fuerzas Laterales Mínimas (Vb y Vs):

Especificación de las fuerzas sísmicas mínimas que deben considerarse para el diseño del sistema de aislamiento y para los elementos estructurales ubicados debajo y encima del sistema de aislamiento, respectivamente.

Distribución Vertical de Fuerzas y Límites de Deriva:

Es la definición de distribución de fuerzas a lo largo de la altura de la estructura y los límites de deriva permisibles, lo que garantiza la estabilidad y el desempeño adecuado de la estructura.

Estas especificaciones están formuladas en términos de fuerzas y desplazamientos máximos, en consonancia con la exigencia de analizar y diseñar estructuras bajo el sismo máximo considerado (MCE). La correcta aplicación de estos requisitos asegura que las estructuras aisladas sísmicamente sean capaces de soportar eventos sísmicos extremos, manteniendo su integridad y funcionalidad.

Requisitos procedimiento de análisis por fuerza horizontal equivalente (ELFM) para estructuras aisladas sísmicamente según ASCE-7-16		
Periodo y desplazamiento para diseño de sistema de aislación		
Desplazamiento máximo	$D_M = \frac{g}{4\pi^2} \frac{S_{M1} T_M}{B_M}$ Ec 17.5-1 ASCE 7-16	
Periodo efectivo para máximo desplazamiento	$T_M = 2\pi \sqrt{\frac{W}{k_M g}}$ Ec 17.5-2 ASCE 7-16	
Desplazamiento total máximo	$D_{TM} = D_M \left[1 + \left(\frac{y}{P_T} \right) \frac{12e}{b^2 + d^2} \right]$ Ec 17.5-3 ASCE 7-16 $P_T = \frac{1}{r_i} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N x_i^2 + y_i^2}{N}}$ Ec 17.5-4 ASCE 7-16	
Nota: El desplazamiento total máximo no debe tomarse menor a 1.15 D_M		
Fuerzas laterales mínimas para diseño		
	Sistema de aislación y elementos estructurales debajo del sistema de aislación	Elementos estructurales arriba del sistema de aislación
Fuerzas laterales	$V_b = k_M D_M$ Ec 17.5-5 ASCE 7-16	$V_s = \frac{V_{st}}{R_1} \quad V_{st} = V_b \left[\frac{W_s}{W} \right] (1 - 2.5 \beta_m)$ Ec 17.5-6 ASCE 7-16
R_1 debe tomarse como $3R/8$, donde R es el coeficiente de capacidad de disipación de energía según el sistema de resistencia sísmica. El R_1 está limitado a un valor máximo de 2 y un valor mínimo de 1.		
NOTA: Las fuerzas laterales mínimas de diseño y los desplazamientos deben calcularse para las propiedades en el límite superior (upper bound) y en el límite inferior (lower bound) del sistema de aislación y se debe seleccionar la condición más crítica para diseño.		
Límite de derivas		
1.5% de la altura del piso (h_{sx})		
S_{M1} Parámetro de aceleración espectral para periodo igual a 1 segundo del espectro para el MCE con amortiguamiento de 5% del crítico. B_M Coeficiente numérico para el amortiguamiento efectivo β_M . β_M Amortiguamiento efectivo. W Peso sísmico efectivo estructura arriba del sistema de aislamiento. W_s Peso sísmico efectivo estructura arriba del sistema de aislamiento, excluyendo el nivel base (nivel justo encima del sistema de aislación). k_M Rigidez efectiva del sistema de aislamiento para el desplazamiento máximo en la dirección horizontal bajo consideración. y Distancia entre el centro de rigidez del sistema de aislamiento y el elemento de interés medida perpendicularmente a la dirección de la carga sísmica. e Excentricidad actual medida en el plano entre el centro de masa de la estructura sobre la interfaz de aislamiento y el centro de rigidez del sistema de aislamiento. d Dimensión mayor de la estructura. b Dimensión menor de la estructura medida perpendicular a d . x_i, y_i Distancias horizontales medidas desde el centro de masa del sistema de aislación a cada aislador en las dos direcciones horizontales. N Número de aisladores en el sistema de aislación. r_i Radio de giro del sistema de aislación.		

Tabla 3. Requisitos procedimiento de análisis por fuerza horizontal equivalente. Nota. tabla detalla los requisitos del análisis por fuerza horizontal equivalente (ELFM) para estructuras aisladas sísmicamente según la ASCE 7-16. Fuente: Oviedo y Duque (2006).

Implementación de los aisladores sísmicos en la estructura de estudio

En este capítulo se procederá a la implementación de los aisladores sísmicos de acuerdo con los lineamientos establecidos por las normativas vigentes. La implementación se desarrollará mediante un procedimiento detallado y sistemático, cuyo paso a paso se encuentra claramente referenciado en la siguiente tabla elaborada por el ingeniero Sergio González. Esta tabla proporciona una guía exhaustiva y comprensiva de cada etapa del proceso, cubriendo todos los aspectos necesarios para asegurar una instalación correcta y eficiente.

La guía comienza con la selección y especificación de los aisladores sísmicos, donde se describen los criterios técnicos y normativos que deben cumplirse para elegir los dispositivos adecuados para cada tipo de estructura y condición sísmica específica. Posteriormente, se aborda el diseño de la base de aislamiento, incluyendo los requisitos estructurales y de construcción que garantizan la compatibilidad y el desempeño óptimo de los aisladores.

Una vez seleccionados y especificados los aisladores, se detalla el procedimiento de instalación, proporcionando instrucciones precisas sobre las técnicas y prácticas recomendadas para la correcta fijación y colocación de los aisladores en la estructura. Finalmente, la tabla incluye los métodos para la verificación y pruebas de los aisladores, asegurando que la instalación cumple con los estándares de seguridad y funcionalidad requeridos. Estas pruebas son cruciales para confirmar que los aisladores desempeñarán su función de manera efectiva durante un evento sísmico. Este enfoque integral y metodológico garantiza que todos los aspectos de la implementación de los aisladores sísmicos sean cubiertos con el máximo rigor técnico, asegurando así la seguridad y durabilidad de las estructuras tratadas.

Paso a paso de diseño para estructuras aisladas sísmicamente (ASCE-7-16)	
Etapa de diseño	ASCE 7-16
Paso 1	Localización, tipo de suelo (A, B, C, D, E, F), nivel de amenaza sísmica y determinación de los parámetros S_1 (aceleración espectral para el sismo máximo considerado (MCE) para un periodo de 1 seg) y S_s (aceleración espectral para el sismo máximo considerado (MCE), para periodos cortos)
Paso 2	Determinar los coeficientes de sitio (F_a), (F_v), según el tipo de suelo y los valores de S_1 y S_s , a partir de las tablas 11.4-1 y 11.4-2 (ASCE-7-16).
Paso 3	Establecer el coeficiente de importancia, en este caso al ser una estructura aislada, se puede tomar $I=1$ para cualquier tipo de estructura.
Paso 4	Construir el espectro para el sismo máximo considerado (MCE).
Paso 5	Definir las características de la estructura y del material estructural a emplear; en este sentido, se debe elegir el sistema estructural y la capacidad de disipación de energía en el rango elástico del sistema estructural (DES, DMO, DMI).
Paso 6	Determinar el coeficiente de capacidad de disipación de energía del sistema estructural (R) y el coeficiente de reducción según el sistema estructural (R_1), que debe tomarse como $3R/8$, teniendo en cuenta un valor límite máximo de 2 y mínimo de 1. Los factores de reducción son menores para las estructuras aisladas, debido a que el cambio en el periodo genera que el sistema estructural fluya bajo una fuerza que es el doble de una estructura tradicional, lo que puede generar mayor participación de los modos superiores, de esta manera al utilizar un factor de reducción menor se puede hacer un mejor control del daño (Farzeed & Kelly, 1999).
Paso 7	Definir el procedimiento de análisis a utilizar entre el método de la fuerza horizontal equivalente (ELFM), método de análisis dinámico espectral (RSA) o método de análisis en el tiempo (NLTHA), esto según la tabla 9.
Paso 8	Para el prediseño del sistema de aislación se utilizan las ecuaciones del método (ELFM), tal como se indican en la tabla 11, de igual manera el ajuste de resultados para los procedimientos de análisis dinámicos se hace con respecto a los valores del método (ELFM).
Paso 9	Seleccionar el tipo de sistema de aislación (aisladores de goma de alto amortiguamiento HDR, aisladores de goma con núcleo de plomo LRB, aisladores de goma natural RB, deslizadores SLD, etc) y determinar los coeficientes para el amortiguamiento efectivo B_M según la tabla 17.5-1 del ASCE-7-16, en este sentido es recomendable tomar un valor de amortiguamiento efectivo de entre un 20% y un 30% para los aisladores tipo LRB por ejemplo.
Paso 10	Seleccionar el periodo de vibración objetivo para el desplazamiento máximo (T_M). Para que el sistema de aislación sea eficiente se debe buscar un periodo objetivo de entre 2-5.5 seg, según el tipo de edificación. En taiwán, por ejemplo, se tiene un edificio de 133.2m de altura aislado en la base con $T_M=5.18$ seg (Wang et al, 2017).
Paso 11	Estimar el valor de la rigidez efectiva del sistema de aislación para el desplazamiento máximo (K_M), para ello basta con despejar este valor de la fórmula para calcular T_M , tomando como base el periodo objetivo estimado y el peso de la estructura arriba del sistema de aislación (W).
Paso 12	Estimar el valor del desplazamiento máximo (D_M) inicialmente. Este valor es supremamente importante ya que determina la viabilidad del proyecto en sí, puesto que la estructura aislada debe quedar dilatada un valor igual o mayor al desplazamiento total máximo ($D_{TM} \approx 1.15 D_M$) de cualquier obstáculo que impida el desplazamiento de sistema de aislación (ascensores, escaleras, elementos estructurales como vigas, dados, columnas, etc). En caso que se excedan los desplazamientos máximos permitidos debe hacerse un sistema más rígido, aumentando la rigidez efectiva (K_M), lo cual genera una disminución en el periodo (T_M), por lo cual es importante aclarar que en estructuras altas debe coordinarse con el arquitecto del proyecto desplazamientos del orden de 40cm-80cm, aproximadamente.
Paso 13	Establecer las fuerzas mínimas de diseño de la subestructura y sistema de aislación (V_b) y de la supeestructura (V_s) según los parámetros establecidos del paso 9 a 12.
Paso 14	Hacer un diseño previo del sistema de aislación, tomando propiedades de las tablas proporcionadas por empresas proveedoras de aisladores como DIS, Bridgestone, ALGA, FIP industriale, entre otras, en estas tablas pueden verse dimensiones en planta, capacidades de carga, alturas típicas de los aisladores, rangos de rigideces efectivas laterales y rigideces efectivas verticales, entre otros parámetros.
Paso 15	Hacer un modelo estructural previo en el programa de análisis deseado, complementando con un diseño estructural previo para tener una idea de las dimensiones de los elementos estructurales (columnas, vigas, viguetas, muros estructurales, etc), tener en cuenta la disminución en el coeficiente de capacidad de disipación de energía del sistema estructural R_1 con respecto a las estructuras tradicionales para temas de diseño.
Paso 16	Hacer contacto con empresa proveedora de los aisladores sísmicos a utilizar, para un diseño previo del sistema de aislación, la empresa DIS por ejemplo, entrega unas plantillas de excel donde deben colocarse parámetros importantes como el espectro para el sismo de diseño (DBE), espectro para el sismo máximo considerado (MCE), y otra plantilla de excel donde debe entregarse para cada punto donde se vaya a hacer el aislación, carga muerta (DL), carga viva (LL), combinación DL+0.5LL y ubicación de aisladores en planta para determinación de centro de masa y centro de rigidez del sistema de aislación, de esta manera se reciben los parámetros básicos para ingresar al modelo de cálculo del programa de análisis estructural deseado.
Paso 17	Realizar paso 10 a 15 nuevamente.
Paso 18	Hacer chequeo de derivas, corrección dinámica según tabla 12 y proceder a diseñar la estructura finalmente, es importante resaltar que el análisis y diseño final de la estructura se debe evaluar para las propiedades en el límite superior (upper bound) y en el límite inferior (lower bound) del sistema de aislación, eligiendo la condición más crítica.

Tabla 4. Paso a paso para el diseño de estructuras aisladas. Fuente: : Oviedo y Duque (2006).

En el análisis de la estructura de estudio, se utilizará el método estático lineal de fuerza horizontal equivalente (ELFM) para estructuras aisladas, conforme a lo estipulado en la norma ASCE 7-16. Este método permitirá evaluar de manera precisa y rigurosa los desplazamientos y fuerzas que actúan sobre la estructura, asegurando que se cumplan con los requisitos de seguridad y desempeño establecidos por la normativa.

El método ELM se selecciona por su capacidad para proporcionar un análisis detallado de las respuestas estructurales bajo cargas sísmicas, especialmente en sistemas de aislamiento. Este enfoque considera los desplazamientos máximos permitidos, las fuerzas laterales mínimas y los criterios de diseño específicos que garantizan la estabilidad y seguridad de la estructura aislada. Al aplicar este método, se asegurará que la estructura pueda resistir de manera efectiva los efectos de las fuerzas sísmicas, minimizando el riesgo de daño y optimizando su desempeño durante un evento sísmico. La implementación del método ELM según la ASCE 7-16 en este análisis se realizará siguiendo los procedimientos y parámetros técnicos definidos en la normativa, proporcionando así un marco de referencia robusto y confiable para el diseño y evaluación de la estructura.

En el diseño de estructuras aisladas sísmicamente, uno de los factores cruciales a considerar es el factor de reducción por ductilidad R_I . Este factor se define como una medida de la capacidad de la estructura para disipar energía a través de deformaciones inelásticas. De acuerdo con las especificaciones para estructuras en Estados Unidos, el factor de reducción por ductilidad R_I debe ser el menor valor entre 2 y $\frac{3}{8}R_0$, donde R_0 es el coeficiente de capacidad de disipación de energía para una estructura con base fija.

El valor de R_0 es determinado en función de las características de la estructura base fija sin aislamiento y refleja la capacidad intrínseca del sistema estructural para disipar energía durante un evento sísmico. La relación $\frac{3}{8}R_0$ ajusta este valor para estructuras aisladas, considerando que el sistema de aislamiento modifica la respuesta sísmica de la estructura, generalmente mejorando su comportamiento al reducir las demandas de deformación en la superestructura.

En el contexto del diseño de estructuras aisladas sísmicamente, se recomienda emplear un factor de reducción por ductilidad R_I inferior al utilizado en estructuras de base fija. Este enfoque es crucial para mejorar el control del daño en los elementos estructurales durante eventos sísmicos significativos. En el código colombiano, por ejemplo, se establece un factor de $R=7$ para sistemas estructurales aporticados, lo cual indica una capacidad robusta para disipar energía sísmica. Sin embargo, en el caso de estructuras aisladas sísmicamente, la utilización de un R_I menor es fundamental para adaptar el diseño a las características específicas de estos sistemas.

Este ajuste se fundamenta en estudios como el de Farzeed & Kelly (1999), que destacan la importancia de reducir el R_I para lograr un control más efectivo del daño estructural. Al implementar un R_I inferior, se asegura que las fuerzas y deformaciones durante un sismo se mantengan dentro de límites seguros para la estructura, mitigando así el riesgo de daños severos. Esta práctica no solo cumple con las normativas vigentes sino que también optimiza el desempeño estructural bajo condiciones sísmicas severas.

R_I , que debe tomarse como el menor valor entre 2 y $(3/8) R_o$ (coeficiente de capacidad de disipación de energía para estructura de base fija)

Los muros de concreto reforzado, tienen un valor de coeficiente básico de disipación de energía R_0 para DMO es igual a 4

$$R_I = (3/8) * (4) = 1.5$$

El tipo de sistema de aislación seleccionado para la estructura de estudio consiste en el uso de aisladores de goma con núcleo de plomo (Lead Rubber Bearings, LRB). Este sistema se caracteriza por su capacidad para disipar energía y controlar los desplazamientos inducidos por movimientos sísmicos, ofreciendo una protección robusta contra cargas sísmicas. Además, se llevará a cabo un estudio complementario de la estructura utilizando deslizadores (Sliding Bearings, SLD). Los deslizadores permiten movimientos horizontales controlados, reduciendo significativamente las fuerzas sísmicas

transmitidas a la superestructura. Esta evaluación adicional con deslizadores (SLD) tiene como objetivo determinar la combinación óptima de sistemas de aislamiento para maximizar la eficiencia sísmica y la seguridad estructural en eventos sísmicos severos, proporcionando una solución integral y avanzada en la ingeniería sísmica de la estructura en cuestión.

Sismo máximo considerado (MCE)

En el caso de estructuras con base fija, el espectro objetivo empleado para el análisis dinámico no lineal corresponde al espectro máximo esperado (MCE), definido en el capítulo 11 del código ASCE 7. Este espectro, también conocido como Risk-Targeted Maximum Considered Earthquake (MCER), equivale a 1.5 veces el espectro de diseño BDE, según lo establecido en la sección 11.4.7. Para determinar esta intensidad sísmica máxima, se consideran dos enfoques principales: (1) el uso del espectro predefinido especificado en el código de diseño aplicable, y (2) la incorporación de registros de movimientos del suelo.

Como descripción de la aceleración de respuesta del terreno ajustada por riesgo para el sismo máximo considerado (MCE) se tomó el menor valor entre el probabilista y el determinista para cada ordenada espectral. Entonces, los movimientos sísmicos producidos por el Máximo Sismo Considerado (MCE) se definen directamente como las ordenadas de un espectro de aceleraciones horizontales con 5% de amortiguamiento. Esto se realiza por medio de dos parámetros:

S_s = Valor del espectro de aceleraciones para el Máximo Sismo Considerado (MCE), con 5% de amortiguamiento, en roca, para un período de 0.2 segundos tal como se presenta en los mapas de amenaza sísmica desarrollados para este efecto.

S₁ = Valor del espectro de aceleraciones para el Máximo Sismo Considerado (MCE), con 5% de amortiguamiento, en roca, para un período de 1 segundo tal como se presenta en los mapas de amenaza sísmica desarrollados para este efecto.

Es importante anotar que los estudios de amenaza sísmica realizados para obtener los valores de S_s y S_1 , se realizan directamente para la ordenada espectral utilizando ecuaciones de atenuación apropiadas para el contexto tectónico e independientes para los dos parámetros. Para sitios donde el perfil de suelo subyacente es diferente de roca, las ordenadas espectrales para el Máximo Sismo Considerado se definen de la siguiente manera:

$$\mathbf{Sms} = F_a * S_s \quad (\text{Ecu. H-4-1 de ASCE 7-10})$$

$$\mathbf{SM1} = F_v * S_1 \quad (\text{Ecu. 11.4-2 de ASCE 7-10})$$

Donde:

F_a= Coeficiente de sitio para un período de 0.2 segundos.

F_v= Coeficiente de sitio para un período de 1 segundo.

S_{ms}= Valor del espectro de aceleraciones horizontales para el Máximo Sismo Considerado (MCE), con 5% de amortiguamiento, ajustado por efectos de sitio, para un período de 0.2 segundos.

S_{m1}= Valor del espectro de aceleraciones horizontales para el Máximo Sismo Considerado (-.MCE), con 5% de amortiguamiento, ajustado por efectos de sitio, para un período de 1 segundo.

Según el documento AIS 180-13, el valor del espectro de aceleraciones para el MCE con el 5% de amortiguamiento para periodo de 1 segundo (S_1), equivale a 0.3, tomando como referencia el mapa de valores para S_1 del apéndice C, en el cual Bogotá corresponde a la región 3.

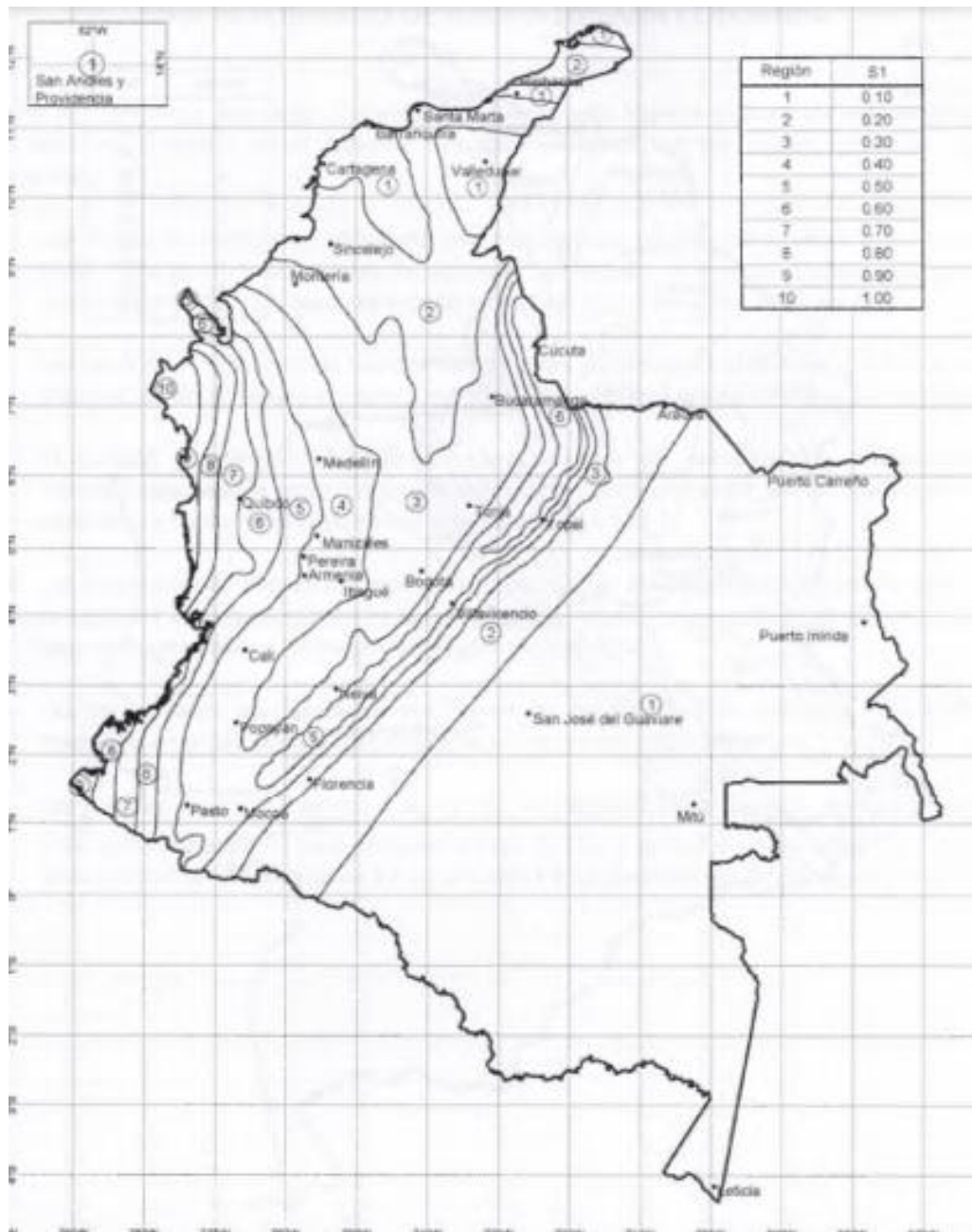


Figura 13. Mapa de valores para la determinación del parámetro (S1). Nota. Este mapa ilustra los valores regionales del parámetro S1, que son esenciales para el análisis y diseño sísmico conforme a las normativas vigentes. Fuente: Aranguren Sedano (2012).

El SM1 debe calcularse según el documento AIS 180-13 de la asociación colombiana de ingeniería sísmica. Y su formula es la siguiente

$$SM1 = F_v * S1$$

Para nuestra estructura los valores son los siguientes:

$$F_v = 2.1$$

$$S_1 = 0.3$$

$$SM_1 = 2.1 * 0.3 = 0.63$$

Para calcular la aceleración espectral de diseño para el MCE, se usa la siguiente fórmula básica en la normativa estadounidense (ASCE 7):

$$SDS = 1.5 \cdot F_a \cdot S_s$$

$$SD_1 = 1.5 \cdot F_v \cdot S_1$$

Donde:

SDS: es la aceleración espectral de diseño para un periodo corto (normalmente 0.2 segundos).

SD1: es la aceleración espectral de diseño para un periodo de 1 segundo.

SS : es la aceleración espectral máxima en el suelo firme para un periodo corto (0.2 segundos).

S1 : es la aceleración espectral máxima en el suelo firme para un periodo de 1 segundo.

F_a y F_v son los factores de amplificación del sitio para periodos cortos y largos, respectivamente.

Según el documento AIS 180-13, el valor del espectro de aceleraciones para el MCE con el 5% de amortiguamiento para periodo de 0.2 segundos (S_1), equivale a 0.4, tomando como referencia el mapa de valores para S_s del apéndice C, en el cual Bogotá corresponde a la región 2.

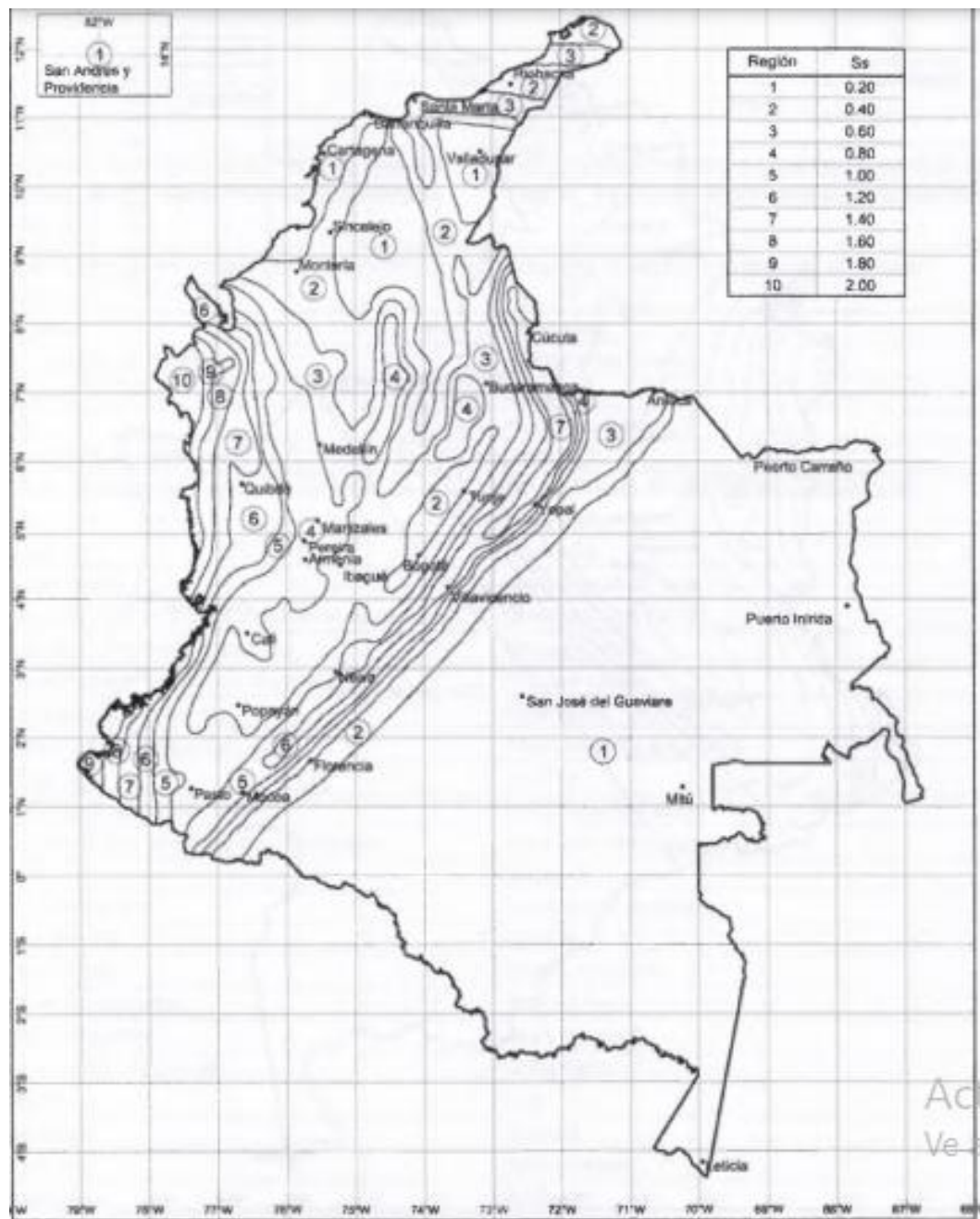


Figura 14. Mapa de valores para Ss. Fuente: Aranguren Sedano (2012).

El S_{ms} debe calcularse según el documento AIS 180-13 de la asociación colombiana de ingeniería sísmica. Y su formula es la siguiente

$$S_{ms} = F_a * S_s$$

$$S_{ms} = 0.95 * 0.4$$

$$S_{ms} = 0.38$$

Con base en los valores previamente determinados, se procede a ejecutar la siguiente ecuación, incorporando los parámetros identificados conforme a las especificaciones establecidas.

$$SDS = 1.5 \cdot F_a \cdot S_s$$

$$SD1 = 1.5 \cdot F_v \cdot S1$$

$$SDS = 1.5 \cdot 0.95 \cdot 0.4 = 0.57 \text{ g}$$

$$SD1 = 1.5 \cdot 2.10 \cdot 0.3 = 0.945 \text{ g}$$

Coeficiente de amortiguamiento

Valores Típicos de Amortiguamiento

Para estructuras con aisladores sísmicos, el coeficiente de amortiguamiento efectivo suele estar en un rango más alto debido a los materiales y mecanismos utilizados en los aisladores. Estos valores pueden variar dependiendo del tipo de aislador y del sistema específico utilizado.

Aisladores de goma de alto amortiguamiento (HDRB, High Damping Rubber Bearings): Típicamente proporcionan un amortiguamiento efectivo del 10% al 15%.

- Aisladores de goma con núcleo de plomo (LRB, Lead Rubber Bearings): Tienen un amortiguamiento efectivo del 15% al 20%.
- Aisladores de péndulo friccional (FPS, Friction Pendulum System): Pueden alcanzar coeficientes de amortiguamiento del 20% al 30% o más.

Se recomienda utilizar un porcentaje crítico de amortiguamiento efectivo del **20%** en aisladores de goma con núcleo de plomo (LRB) debido a su capacidad demostrada

para optimizar la disipación de energía durante eventos sísmicos. Este nivel de amortiguamiento no solo cumple con las normativas y estándares de diseño sísmico, asegurando que la estructura mantenga niveles seguros de desempeño estructural y control de daños, sino que también ofrece un equilibrio óptimo entre rendimiento y costos. La experiencia práctica respalda su eficacia en diversas aplicaciones estructurales, proporcionando una solución confiable y efectiva para mejorar la seguridad y la resistencia sísmica de las edificaciones. Según las recomendaciones anteriormente enunciadas El factor de amortiguamiento efectivo para un porcentaje del 20% es de **1.5**.

Tabla 17.5-1 Coeficientes de Amortiguamiento, B_D o B_M	
Amortiguamiento efectivo, β_D o β_M (porcentaje crítico) ^{a,b}	Factor B_D o B_M
≤ 2	0.8
5	1.0
10	1.2
20	1.5
30	1.7
40	1.9
≥ 50	2.0
^a El coeficiente de amortiguamiento será basado en el amortiguamiento efectivo del sistema de aislamiento determinado de acuerdo con los requerimientos de la sección 17.8.5.2. ^b El coeficiente de amortiguamiento será basado en una interpolación lineal para otros valores de amortiguamiento efectivo que los dados en la tabla.	

Tabla 5. Valores para el coeficiente de amortiguamiento (B_M). Fuente: UPTC (2010).

Periodo de vibración objetivo ($T_{M\text{ Objetivo}}$)

1. Principios de Aislamiento Sísmico

El aislamiento sísmico se basa en desacoplar la estructura del movimiento del suelo para reducir las fuerzas inducidas por el sismo. Un periodo de vibración más largo generalmente implica menores aceleraciones y fuerzas en la superestructura. Esto es debido a que el diseño busca desplazar el espectro de respuesta de la estructura hacia periodos más largos donde las aceleraciones sísmicas son menores.

2. Caracterización de Edificios con Aisladores Sísmicos

Para edificios con aisladores sísmicos, el periodo de vibración efectivo es una combinación del periodo de la superestructura y del sistema de aislamiento. Los aisladores sísmicos añaden flexibilidad a la base de la estructura, incrementando el periodo de vibración total.

- Periodo de la Superestructura (Sin Aislamiento): Para un edificio de 12 pisos, el periodo de vibración natural sin aisladores típicamente oscila entre **1.0 y 1.5 segundos**, dependiendo de las propiedades de rigidez y masa de la estructura.

Periodos de Vibración T leídos:

- $T_x = 0.830$ (seg)
- $T_y = 0.757$ (seg)

3. Efecto de los Aisladores Sísmicos

Los aisladores están diseñados para aumentar significativamente el periodo de vibración de la estructura. Los periodos típicos para edificios con aisladores sísmicos están en el rango de 2 a 4 segundos, dependiendo del diseño del sistema de aislamiento.

- Incremento del Periodo: La incorporación de aisladores de base puede incrementar el periodo de vibración de una estructura desde 1.5 segundos (sin aislamiento) hasta alrededor de **4 segundos**.

4. Beneficios de un Periodo Largo

Un periodo de vibración de 4 segundos en un edificio de 12 pisos proporciona varios beneficios:

- Reducción de Aceleraciones: Los espectros de diseño sísmico muestran que las aceleraciones espectrales disminuyen significativamente en periodos más largos. Al desplazar el periodo de vibración a 4 segundos, la estructura experimenta menores fuerzas sísmicas.
- Menores Esfuerzos en la Superestructura: Las menores aceleraciones resultan en menores fuerzas internas y desplazamientos relativos entre pisos (drifts), reduciendo el daño potencial a los elementos estructurales y no estructurales.

- Mayor Seguridad y Confort: Un periodo de vibración largo contribuye a una mejor protección de los ocupantes y contenidos de la edificación durante un evento sísmico, así como a una sensación de confort durante el movimiento.

Dada la información recopilada y los parámetros de diseño establecidos, se ha determinado que el periodo de vibración efectivo a utilizar para la estructura será de 4 segundos. ($T_M = 4 \text{ seg}$). Este valor ha sido calculado considerando las propiedades dinámicas específicas del sistema de aislación seleccionado, así como las características inherentes de la superestructura y las condiciones del sitio. Un periodo de vibración de 4 segundos permitirá una adecuada disipación de energía y un control eficiente de los desplazamientos inducidos por cargas sísmicas, optimizando así el comportamiento global de la estructura bajo condiciones sísmicas severas. Esta elección se alinea con los estándares de diseño sísmico avanzados, garantizando tanto la seguridad estructural como la funcionalidad post-sismo.

Rigidez efectiva objetivo ($K_{M \text{ objetivo}}$)

A partir del periodo de vibración objetivo de la estructura, se procedió a calcular la rigidez efectiva objetivo ($K_{M \text{ objetivo}}$) del sistema de aislación. Para este cálculo, se consideró un peso sísmico total de la superestructura situada sobre el sistema de aislación de $W=7295$ toneladas, con una distribución de carga que asume un peso de 12 toneladas por metro cuadrado. Este valor de rigidez efectiva objetivo es crucial para asegurar que el sistema de aislación cumpla con los requisitos de diseño sísmico, proporcionando una respuesta adecuada a las demandas sísmicas anticipadas. El análisis de la rigidez se llevó a cabo teniendo en cuenta las propiedades dinámicas del sistema de aislación y la interacción con la superestructura, garantizando así una disipación eficiente de la energía sísmica y el control de desplazamientos dentro de los límites establecidos por las normativas sísmicas vigentes. Para llevar a cabo el procedimiento se utilizó la siguiente ecuación

$$K_{M\text{ Objetivo}} = 4\pi^2 * \frac{W}{g * T_M^2}$$

$$K_{M\text{ Objetivo}} = 4\pi^2 * \frac{7295\text{ (Ton)}}{9,81 \left(\frac{m}{s^2}\right) * (4\text{ s})^2}$$

$$K_{M\text{ Objetivo}} = 1834.83\text{ tonf/m}$$

Se tuvo como resultado una rigidez del sistema de aislación de 1834.83 tonf/m, ahora bien, como necesitamos repartir esa rigidez en los 18 aisladores utilizados tipo (LRB), se encuentra que se necesita que los aisladores tengan una rigidez efectiva de 101.93 tonf/m

Desplazamiento máximo objetivo (DM objetivo)

El desplazamiento máximo objetivo (DM objetivo) se refiere al valor máximo de desplazamiento lateral que se espera o se diseña para que una estructura alcance durante un evento sísmico, especialmente cuando se utiliza un sistema de aislamiento sísmico. Este parámetro es esencial en el diseño y análisis de estructuras aisladas sísmicamente, ya que influye directamente en la capacidad de la estructura para disipar energía y limitar los daños durante un sismo.

Para la determinación del desplazamiento máximo objetivo se utiliza la siguiente ecuación:

$$D_{M\text{ objetivo1}} = \frac{g}{4\pi^2} \frac{S_{M1} T_{M\text{ objetivo}}}{B_M}$$

Para llevar a cabo este cálculo, sustituimos los valores previamente identificados en la ecuación establecida anteriormente.

$$D_{M\text{ Objetivo}} = \frac{9,81 \text{ (m/s}^2\text{)}}{4\pi^2} * \frac{0,63(g\text{-sec}) * 4 \text{ s}}{1.5}$$

$$D_{M\text{ Objetivo}} = 0.46 \text{ m}$$

Basándome en el resultado del desplazamiento máximo objetivo, se coordinaría inicialmente con el diseño arquitectónico del proyecto para incorporar juntas de dilatación entre los elementos estructurales y los ascensores, así como con edificaciones colindantes y otros elementos que puedan restringir el desplazamiento del sistema de aislamiento, con una separación del orden de 46 cm.

Fuerzas mínimas de diseño

Se determinan las fuerzas mínimas de diseño (V_b) para la subestructura y (V_s) para la superestructura en el sistema de aislación, siguiendo las ecuaciones establecidas. Este proceso implica la evaluación meticulosa de las cargas sísmicas esperadas y la respuesta dinámica de la estructura. Es esencial calcular estas fuerzas de manera precisa para garantizar que tanto la subestructura como la superestructura sean capaces de resistir adecuadamente las fuerzas laterales inducidas por eventos sísmicos.

$$V_b = K_M * D_M$$

$$V_{b\text{ inicial}} = 1834.83 \frac{\text{tonf}}{\text{m}} * 0.46 \text{ m}$$

$$V_{b\text{ inicial}} = 753.28 \text{ tonf}$$

$$V_{s\text{ inicial}} = V_b / R_I$$

$$V_{s\text{ inicial}} = \frac{753.28 \text{ tonf}}{1.5}$$

$$V_{s\text{ inicial}} = 502.18 \text{ tonf}$$

Implementación de los aisladores sísmicos de base en el modelo estructural

Se realiza la modelación estructural del edificio residencial empleando la tabla del catálogo de productos proporcionado por la empresa Dynamic Isolation Systems (DIS), el cual se ha obtenido como referencia en la tesis del Ingeniero Civil y Especialista en Estructuras, Sergio González Gordon. Esta referencia permite seleccionar y parametrizar adecuadamente los aisladores sísmicos que se incorporarán en el modelo, asegurando una aproximación precisa basada en datos especializados. Ver tabla 7

Isolator Diameter, D_I (mm)	DESIGN PROPERTIES			Maximum Displacement, D_{max} (mm)	Axial Load Capacity P_{max} (kN)
	Yielded Stiffness, K_d (kN/mm)	Characteristic Strength Q_d (kN)	Compression Stiffness, K_v (kN/mm)		
305	0.2-0.9	0-65	>50	150	450
355	0.2-1.2	0-65	>100	150	700
405	0.3-1.6	0-110	>100	200	900
455	0.3-2.0	0-110	>100	250	1,150
520	0.4-2.3	0-180	>200	300	1,350
570	0.5-2.8	0-180	>500	360	1,800
650	0.5-3.5	0-220	>700	410	2,700
700	0.5-4.2	0-220	>800	460	3,100
750	0.7-4.7	0-265	>900	460	3,600
800	0.7-5.3	0-265	>1,000	510	4,000
850	0.7-6.1	0-355	>1,200	560	4,900
900	0.7-6.1	0-355	>1,400	560	5,800
950	0.7-6.1	0-490	>1,800	610	6,700
1000	0.8-6.3	0-490	>1,900	660	7,600
1050	0.9-6.3	0-580	>2,100	710	8,500
1160	1.1-6.5	0-665	>2,800	760	13,800
1260	1.2-6.7	0-755	>3,700	810	20,500
1360	1.4-7.0	0-890	>5,100	860	27,600
1450	1.6-7.2	0-1,025	>5,300	910	33,400
1550	1.8-7.4	0-1,025	>6,500	910	40,000

Tabla 6. Parámetros de Aisladores Sísmicos Basados en el Catálogo de Dynamic Isolation Systems. Fuente: DIS (2018).

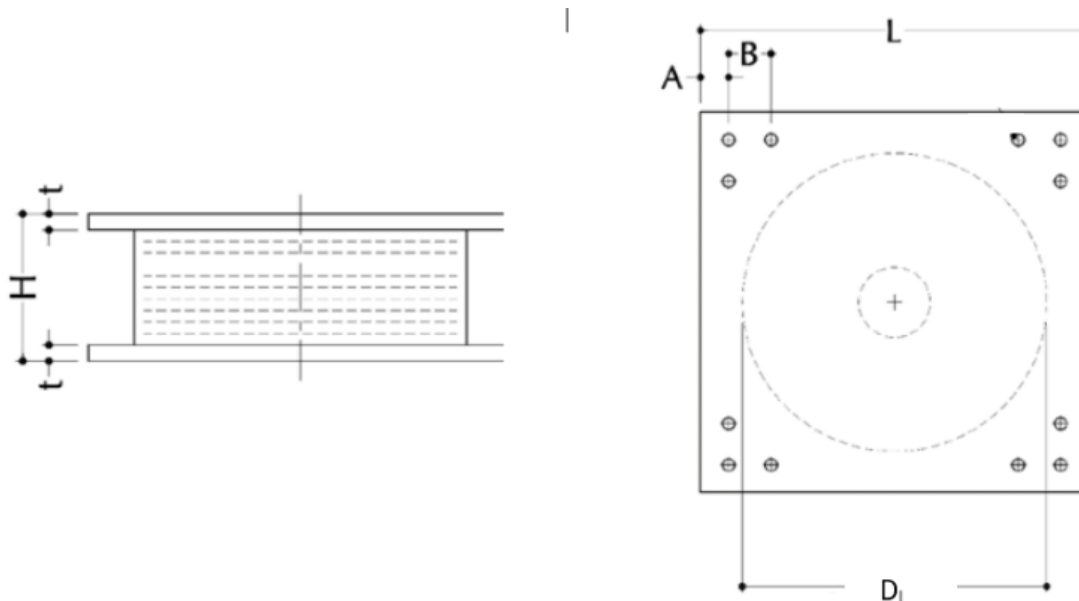


Figura 15. Propiedades geométricas aisladores tipo (LRB)(DIS). Fuente: Gonzalez Gordon (2020).

Las propiedades de los aisladores en el límite superior (upper bound), generan el sistema de aislación con mayor rigidez efectiva (1701.34 ton/m), menor desplazamiento máximo ($DM=41$ cm), menor periodo efectivo ($TM=3.83$ s) y mayor fuerza de diseño para la subestructura y el sistema de aislación ($V_b=753.28$ tonf) y para la superestructura ($V_s=502.18$ tonf), por lo tanto, son las propiedades que definen todo el refuerzo de los elementos estructurales de la subestructura, elementos en el sistema de aislación y la superestructura.

En la Tabla X se exponen las principales propiedades de los aisladores sísmicos, indispensables para el desarrollo de un diseño preliminar del sistema de aislamiento. Dentro de estas propiedades se encuentran la rigidez postfluencia o secundaria (K_d), la cual corresponde a la rigidez lateral $K_2=K_3$, y la rigidez vertical (K_v), equivalente a la rigidez inicial K_1 . También se indica el desplazamiento máximo admisible que el aislador puede soportar, la capacidad de carga máxima (P_{max}), el diámetro del dispositivo (D_1), y la fuerza histerética (Q_d), la cual refleja la energía que el sistema es capaz de disipar en cada ciclo de carga. Estos parámetros técnicos permiten establecer un diseño inicial

fundamentado del sistema de aislación, garantizando una respuesta estructural adecuada bajo condiciones de carga sísmica.

Para modelar los aisladores sísmicos de base en una estructura de 12 pisos ubicada en Bogotá, utilicé el programa Robot Structural Analysis, siguiendo un proceso sistemático que permite simular de manera efectiva el comportamiento de estos dispositivos.

Configuración del Modelo Estructural

Comencé estableciendo el modelo estructural completo, asegurándome de que todos los elementos, como vigas, muros y losas, estuvieran correctamente definidos para los 12 pisos de la edificación. Las cargas muertas y vivas fueron aplicadas conforme a los requisitos establecidos por la normativa NSR-10, que se refiere a la ASCE para el diseño sísmico en Colombia. Este paso es crucial para garantizar que el modelo refleje las condiciones reales a las que estará expuesta la estructura.

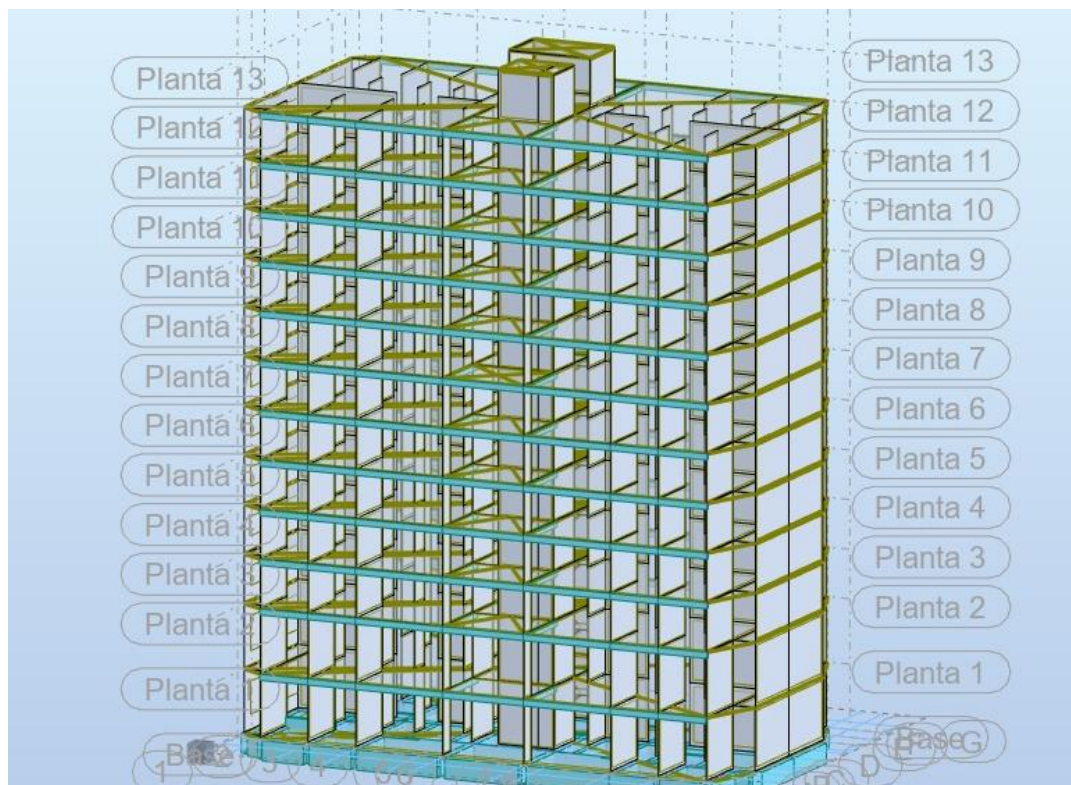


Figura 16. Modelo estructural en el programa Robot structural Analysis 2022. Fuente: Elaboración propia.

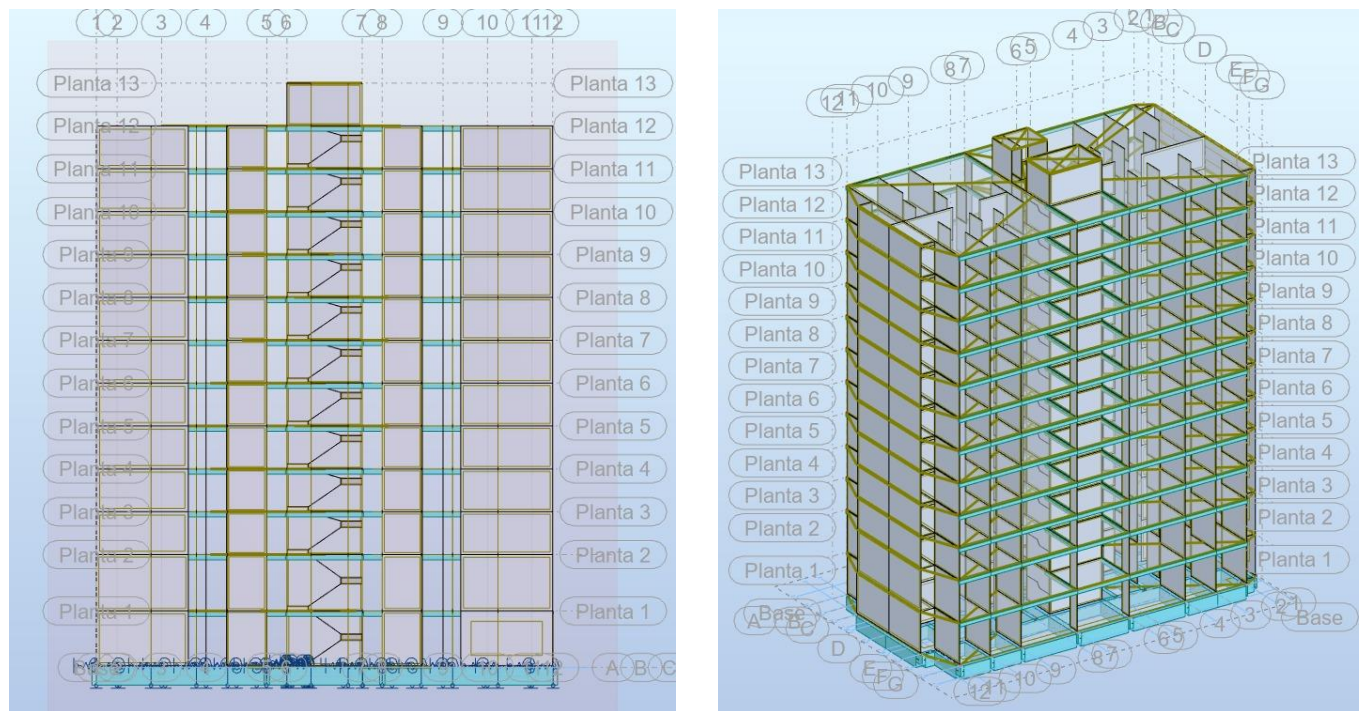


Figura 17. Modelo estructural en el programa Robot structural Analysis 2022. Fuente: Elaboración propia.

Especificación de Aisladores de Base

En la base de la estructura, seleccioné los puntos de apoyo donde se ubicarían los aisladores. Opté por aisladores elastoméricos con núcleo de plomo y resortes de goma, basados en los catálogos de Dynamic Isolation Systems (DIS). Configuré estos nodos como "apoyos no lineales", permitiendo personalizar sus propiedades. Para los aisladores elastoméricos, establecí una rigidez horizontal baja, lo que permite la deformación lateral, y una rigidez vertical alta para soportar las cargas gravitacionales. Adicionalmente, fijé un amortiguamiento efectivo (β_M) entre el 20 % y el 30 % del amortiguamiento crítico, optimizando así la eficiencia en la reducción de fuerzas sísmicas.

Esta distribución ha sido determinada teniendo en cuenta el centro de masa y rigidez de la estructura, buscando evitar desplazamientos torsionales indeseados y asegurar una respuesta sísmica simétrica.

Aplicación de Cargas en los Modelos Estructurales

Para el análisis estructural de la edificación objeto de estudio, se implementaron las cargas gravitacionales y sísmicas conforme a los lineamientos establecidos en la Norma Colombiana de Diseño y Construcción Sismo Resistente (NSR-10), específicamente bajo el sistema de resistencia sísmica mediante muros estructurales de concreto reforzado con capacidad moderada de disipación de energía (DMO).

El modelo estructural fue desarrollado en el software Autodesk Robot Structural Analysis Professional, y se construyó replicando la geometría real de la edificación de 12 niveles con sistema de muros portantes, losas macizas y cimentación mediante placa y pilotes.

Cargas gravitacionales

Las cargas muertas fueron calculadas en función del peso propio de los elementos estructurales (losas, muros, vigas, cubiertas) y no estructurales (acabados, sobrepisos, antepechos), con base en los valores definidos en la memoria de cálculo. Por ejemplo, para pisos tipo con losas de 0.12 m, se obtuvo una carga muerta total de hasta 0.506 tonf/m², incluyendo muros divisorios y acabados.

Las cargas vivas se aplicaron según el uso específico de cada nivel:

- Pisos residenciales: 0.18 tonf/m²
- Parqueaderos: 0.25 tonf/m²
- Escaleras y corredores: 0.30 tonf/m²
- Cubiertas técnicas: 0.18 tonf/m² o menores, dependiendo del acceso

Estas cargas se distribuyeron por nivel mediante cargas superficiales y lineales aplicadas a diafragmas rígidos.

Cargas sísmicas

Se realizó un análisis espectral modal, empleando el espectro de diseño definido para la zona aluvial 300 de Bogotá. Los parámetros sísmicos considerados fueron:

- $A_a = 0.15$, $A_v = 0.20$
- $F_a = 0.95$, $F_v = 2.10$
- Coeficiente de importancia $I = 1.0$
- Grupo de uso I (residencial)
- Sistema DMO en concreto reforzado
- $R = 2.0$, $\Omega_0 = 2.5$
- Análisis P-Delta y efectos de segundo orden incluidos

El espectro de diseño incorporó amortiguamiento del 5 % y consideró irregularidad en altura tipo 5aA. Las cargas sísmicas se definieron en ambas direcciones ortogonales (X y Y) aplicando espectros personalizados para cada eje, y se verificó el cumplimiento del mínimo del 90 % de participación modal.

Modelos con y sin aislamiento

Se generaron distintos modelos para comparar:

1. Estructura con base fija
2. Estructura con base aislada, con tres rigideces distintas de aisladores elastoméricos (152.91, 203.87 y 254.84 tonf/m)

En los modelos aislados, las cargas sísmicas se aplicaron considerando el periodo extendido del sistema, y los desplazamientos de la base fueron controlados a través de elementos de rigidez definida representando los aisladores

COMBIN NUMERO	----- ESTATICAS VERTICALES -----					----- ESTATICAS LATERALES -----				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
	MUERTA	VIVA-1	VIVA-2	VERTI-A	VERTI-B	SISMO-X	SISMO-Y	TORS.AC	VIENT-X	VIENT-Y
1	1.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	1.20	1.60	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3	1.20	0.00	1.60	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	1.20	1.60	1.60	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	1.20	1.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.30	1.00	0.00	0.00
6	1.20	1.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.30	-1.00	0.00	0.00
7	1.20	1.00	1.00	0.00	0.00	-1.00	-0.30	1.00	0.00	0.00
8	1.20	1.00	1.00	0.00	0.00	-1.00	-0.30	-1.00	0.00	0.00
9	1.20	1.00	1.00	0.00	0.00	0.30	1.00	1.00	0.00	0.00
10	1.20	1.00	1.00	0.00	0.00	0.30	1.00	-1.00	0.00	0.00
11	1.20	1.00	1.00	0.00	0.00	-0.30	-1.00	1.00	0.00	0.00
12	1.20	1.00	1.00	0.00	0.00	-0.30	-1.00	-1.00	0.00	0.00
13	0.90	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.30	1.00	0.00	0.00
14	0.90	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.30	-1.00	0.00	0.00
15	0.90	0.00	0.00	0.00	0.00	-1.00	-0.30	1.00	0.00	0.00
16	0.90	0.00	0.00	0.00	0.00	-1.00	-0.30	-1.00	0.00	0.00

Tabla 7. Combinaciones de carga verticales y laterales. Fuente: Elaboración propia.

Aplicación práctica en el modelo

- Las cargas muerta y viva fueron asignadas directamente a los elementos de losas, vigas y muros como cargas uniformemente distribuidas.
- Las cargas sísmicas fueron definidas mediante espectro de diseño en las direcciones X y Y, de acuerdo con la microzonificación de Bogotá y los parámetros establecidos en la memoria.
- La **combinación 5** es la más crítica para el diseño sísmico, ya que introduce efectos dinámicos importantes (acción en X, Y y torsión).
- En los modelos con aisladores sísmicos, se usó esta misma combinación, modificando únicamente el sistema de base para estudiar los efectos de la rigidez en la respuesta estructural.

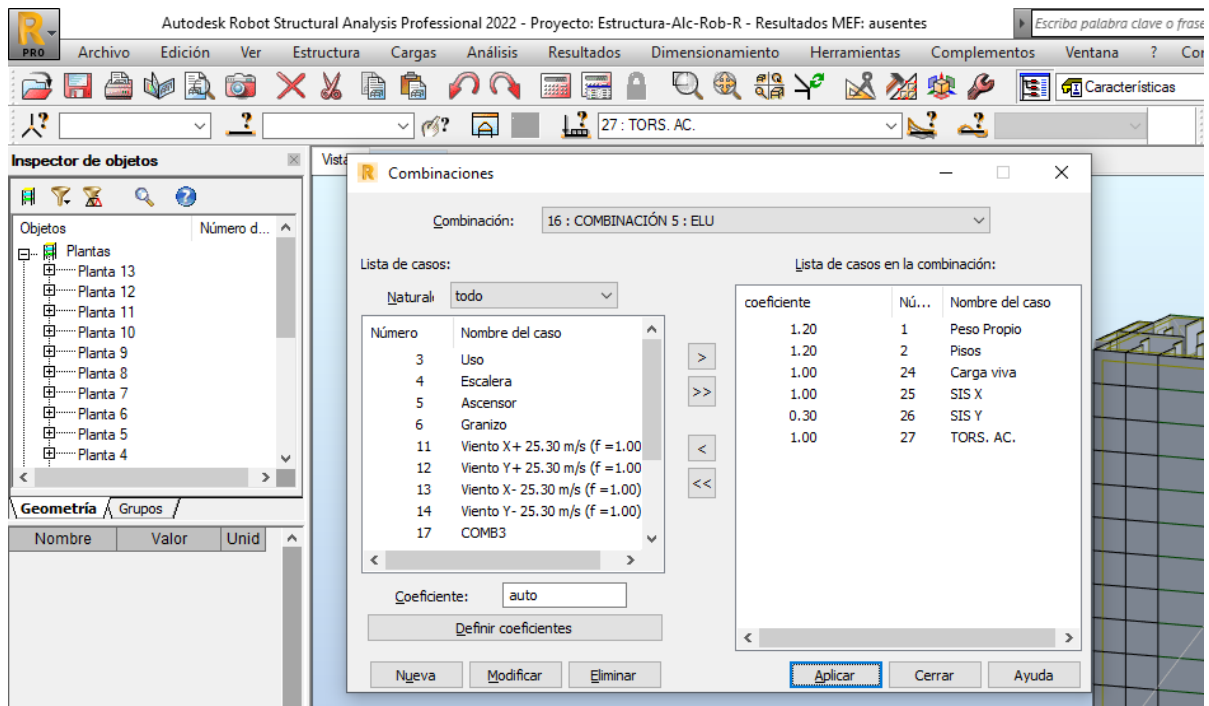


Figura 18. Combinaciones de carga aplicadas al modelo estructural

Ubicación de los Aisladores Sísmicos en la Estructura

Con el fin de implementar el sistema de aislamiento sísmico de base, se ha definido la ubicación estratégica de los aisladores elastoméricos en la base de la estructura. Estos elementos han sido colocados entre la cimentación y la superestructura, distribuidos uniformemente para garantizar un comportamiento sísmico óptimo y una transmisión equilibrada de cargas.

El diseño contempla la instalación de aisladores en todos los puntos de apoyo principales, coincidiendo con los ejes estructurales de muros portantes. La disposición busca maximizar la efectividad del aislamiento, permitiendo que la superestructura se desacople del movimiento del terreno, reduciendo significativamente la demanda sísmica en los elementos superiores.

A continuación, se presenta el plano general de la planta arquitectónica estructural, en el cual se indican con claridad los puntos específicos de instalación de los aisladores:

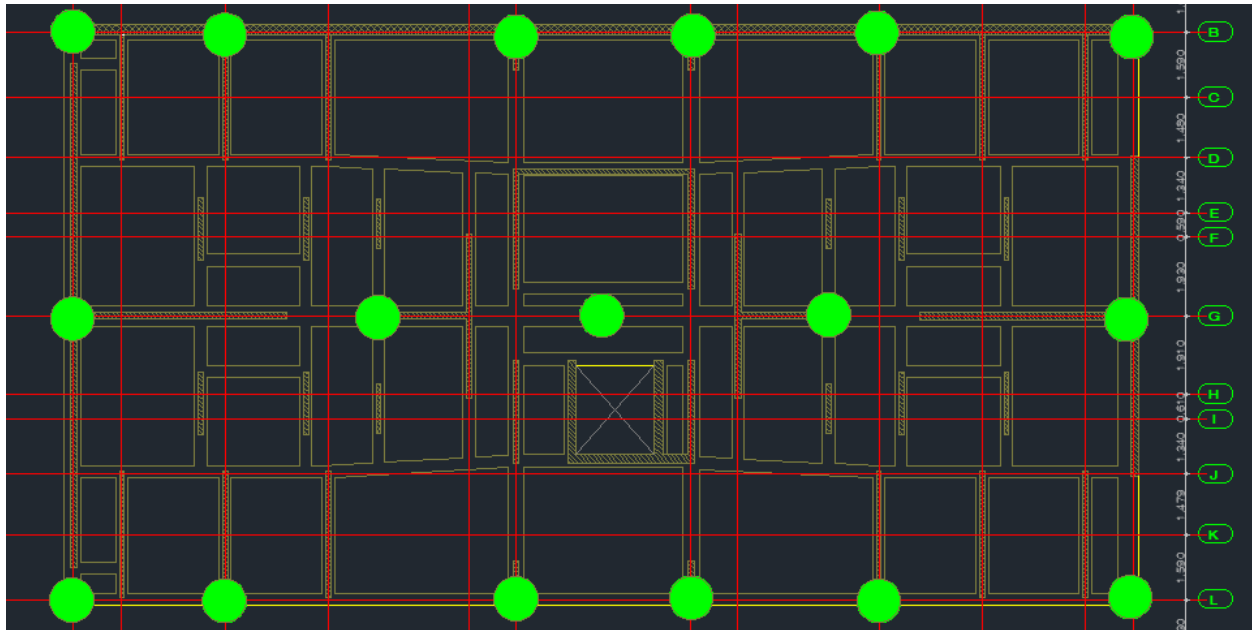


Figura 18. Ubicación de los aisladores sísmicos elastoméricos a lo largo de la base de la estructura. Fuente: Elaboración propia

Definición de Propiedades de los Aisladores Sísmicos en Robot Structural Analysis

En el software de Autodesk Robot Structural Analysis Professional, definimos los apoyos no lineales con propiedades personalizadas.

En la figura a continuación se muestra la ventana de configuración de propiedades de los aisladores elastoméricos utilizada en el modelo estructural. En esta sección del programa se ingresaron los parámetros fundamentales del aislador, tales como:

- Rigidez lateral (K_x , K_y)
- Rigidez vertical (K_z)
- Amortiguamiento equivalente
- Capacidad de desplazamiento máximo
- Comportamiento no lineal (si aplica)

Estos parámetros fueron definidos con base en las características típicas de aisladores elastoméricos disponibles comercialmente, y ajustados según los valores representativos de rigidez baja, media y alta, correspondientes a los tres casos de estudio analizados.

Datos para el modelamiento de la estructura e implementación de los aisladores de base

En este paso se toman los períodos límites, de la estructura estudiada, para el escalado según los requisitos del reglamento ASCE 7-16. Es decir, se toman los períodos fundamentales del edificio de base fija, T y se aplican los límites para el escalado.

El período aislado de la estructura, el amortiguamiento y la rigidez del sistema de aislamiento dependen de los límites impuestos para el desplazamiento máximo de la estructura aislada y de la fuerza de activación del sistema de aislamiento.

El límite máximo del desplazamiento, DM , es de 460 mm para la edificación estudiada, y se supone que no existe una edificación colindante en una distancia menor, siendo este uno de los aspectos principales que se debe tener en cuenta en los diseños con el uso de aisladores sísmicos para evitar el golpeteo con estructuras vecinas.

Variables para análisis	Edificación de estudio
Período base fija (s)	0.7
Período base aislada (s)	3.8
Amortiguamiento (%)	20
Rigidez total del aislamiento KM (Tonf/m)	150
Máximo desplazamiento (m)	0.46

Tabla 8. Variables base para el análisis del modelo estructural. Fuente: Elaboración propia.

Dado que la empresa fabricante no proporcionó un valor exacto de rigidez efectiva (K_{ef}) para los aisladores sísmicos, se evaluaron tres valores distintos con el fin de analizar

su impacto en el comportamiento estructural y obtener un panorama más amplio sobre el desempeño del sistema de aislamiento. Esta variabilidad permite considerar incertidumbres en la fabricación, sensibilidad del periodo estructural y desempeño ante sismos, asegurando un equilibrio entre reducción de aceleraciones y control del desplazamiento lateral. Además, este enfoque facilita la optimización del diseño y justificación técnica, garantizando una selección fundamentada del sistema de aislamiento.

Rigidez (Kef) [tonf/m]	Rigidez(Kef) [Kn/m]	Periodo (T) [s]	Observaciones
152.91	1500	3.8	Caso base; desplazamientos más altos pero mejor aislamiento
203.87	2000	3.29	Rigidez media; desplazamientos moderados, buen equilibrio
254.84	2500	2.91	Mayor rigidez; menor desplazamiento, pero menos eficiencia de aislamiento

Tabla 9. Valores de rigidez y periodo para el análisis comparativo. Fuente: Elaboración propia.

Definición de Propiedades de los Aisladores Sísmicos en Robot Structural Analysis

Para la modelación del sistema de aislamiento sísmico en la estructura de estudio, se utilizó el software Autodesk Robot Structural Analysis Professional, el cual permite incorporar dispositivos de aislamiento en la base de la edificación mediante la definición de apoyos no lineales con propiedades personalizadas.

En la figura a continuación se muestra la ventana de configuración de propiedades de los aisladores elastoméricos utilizada en el modelo estructural. En esta sección del programa se ingresaron los parámetros fundamentales del aislador, tales como:

- Rigidez lateral (Kx, Ky)
- Rigidez vertical (Kz)
- Amortiguamiento equivalente
- Capacidad de desplazamiento máximo

Estos parámetros fueron definidos con base en las características típicas de aisladores elastoméricos disponibles comercialmente, y ajustados según los valores representativos de rigidez baja, media y alta, correspondientes a los tres casos de estudio analizados.

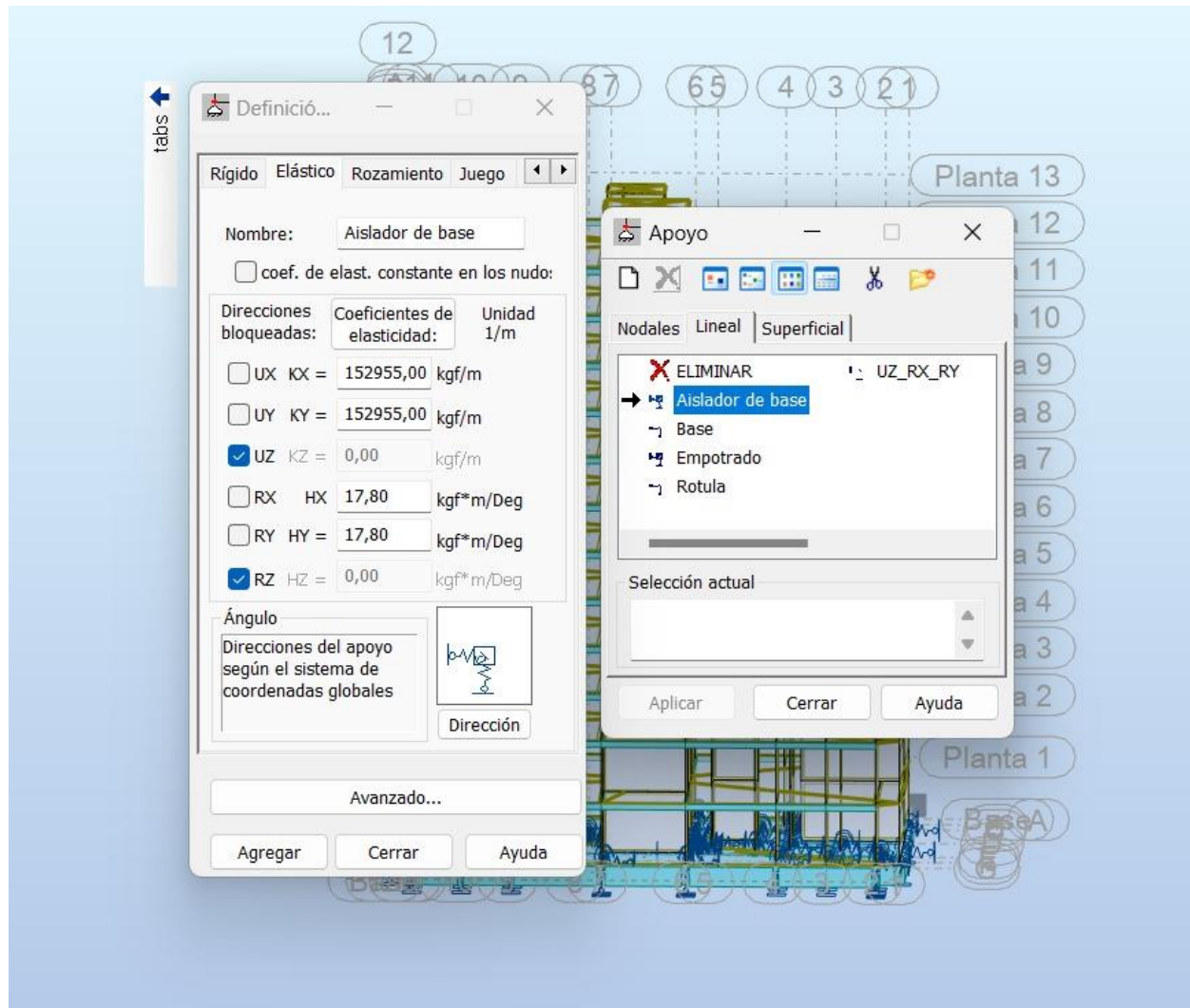


Figura 19. Definición de Propiedades de los Aisladores. Fuente: Elaboración propia.

Esta configuración permitió simular el comportamiento dinámico de la estructura con aisladores, proporcionando resultados confiables en términos de desplazamientos, derivas y cortantes, los cuales fueron comparados con los de la estructura con base fija.

Análisis y Evaluación de Resultados

Una vez ejecutado el análisis estructural, obtuve datos sobre los desplazamientos, esfuerzos y reacciones en los aisladores y los elementos estructurales principales. Los resultados mostraron cómo los aisladores contribuyen a la reducción de las fuerzas sísmicas transmitidas a la estructura, mejorando su respuesta frente a eventos sísmicos.

Optimización y Validación de Parámetros

Posteriormente, revisé y ajusté los parámetros de los aisladores para optimizar el rendimiento del sistema de aislamiento. Realicé iteraciones en los valores de desplazamiento y amortiguamiento hasta asegurar que los aisladores cumplieran con los límites de diseño establecidos por la normativa y que la reducción de la fuerza sísmica fuera efectiva.

Este procedimiento me permitió llevar a cabo una modelación precisa de los aisladores de base en Robot Structural Analysis, facilitando un análisis detallado y la verificación del desempeño de la estructura bajo condiciones sísmicas.

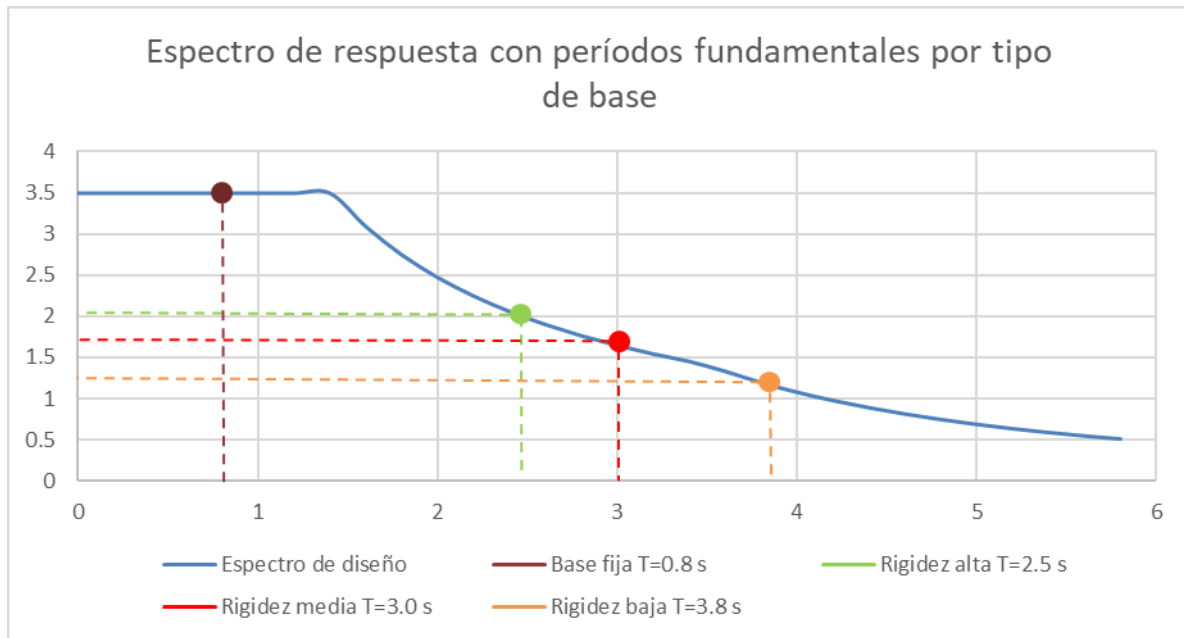
Comparación Espectral de Configuraciones con y sin Aislamiento

Este apartado presenta el efecto de los aisladores sísmicos elastoméricos sobre la respuesta dinámica de la estructura, a partir del análisis del espectro de aceleración.

1. Espectro de diseño aplicado

Se utilizó el espectro definido por la NSR-10 para Bogotá (perfil de suelo tipo D), con parámetros $A_a = 0.15$, $A_v = 0.20$, $F_a = 0.95$ y $F_v = 2.10$. Muestra valores constantes de aceleración hasta 1.4s, decreciendo progresivamente en mayores periodos.

2. Configuraciones y resultados



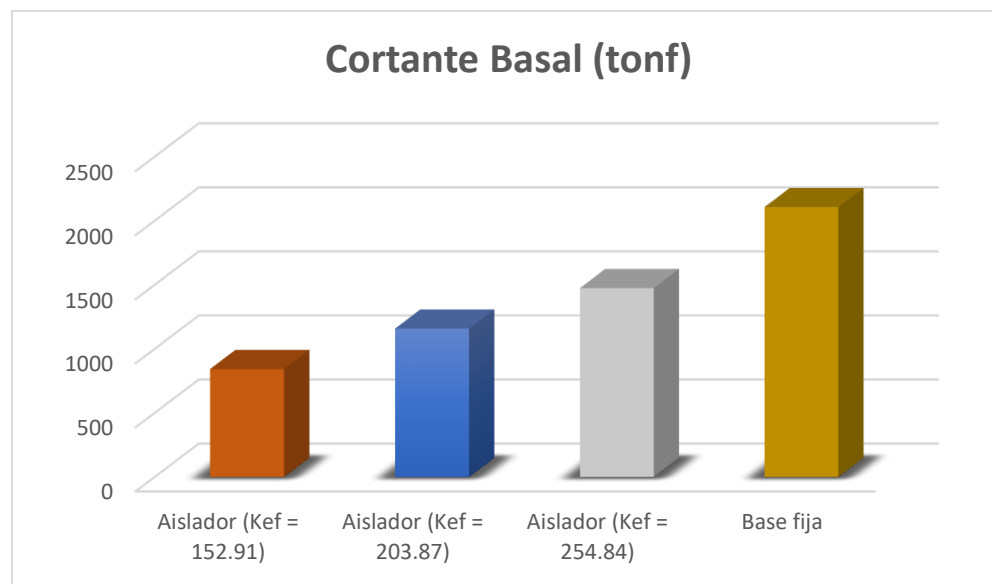
Gráfica 1. Espectro de respuesta sísmica NSR-10 con comparación de aceleraciones espectrales correspondientes a la estructura con base fija y a tres configuraciones de aisladores. Fuente: Elaboración propia

Se evidencia una reducción progresiva de la aceleración espectral a mayor periodo, siendo más notoria con la rigidez baja (reducción del 65 %).

3. Análisis comparativo

La Gráfica 1 muestra cómo el aislamiento desplaza el periodo de la estructura hacia zonas de menor aceleración espectral. Esto reduce significativamente la demanda sísmica, como se refleja también en la disminución del cortante basal y las derivas entrepiso. La rigidez baja resulta la más eficiente, aunque exige controlar el desplazamiento en la base. Este análisis respalda el aislamiento como estrategia efectiva para estructuras medianas en zonas sísmicas.

Cortantes en la base de la estructura

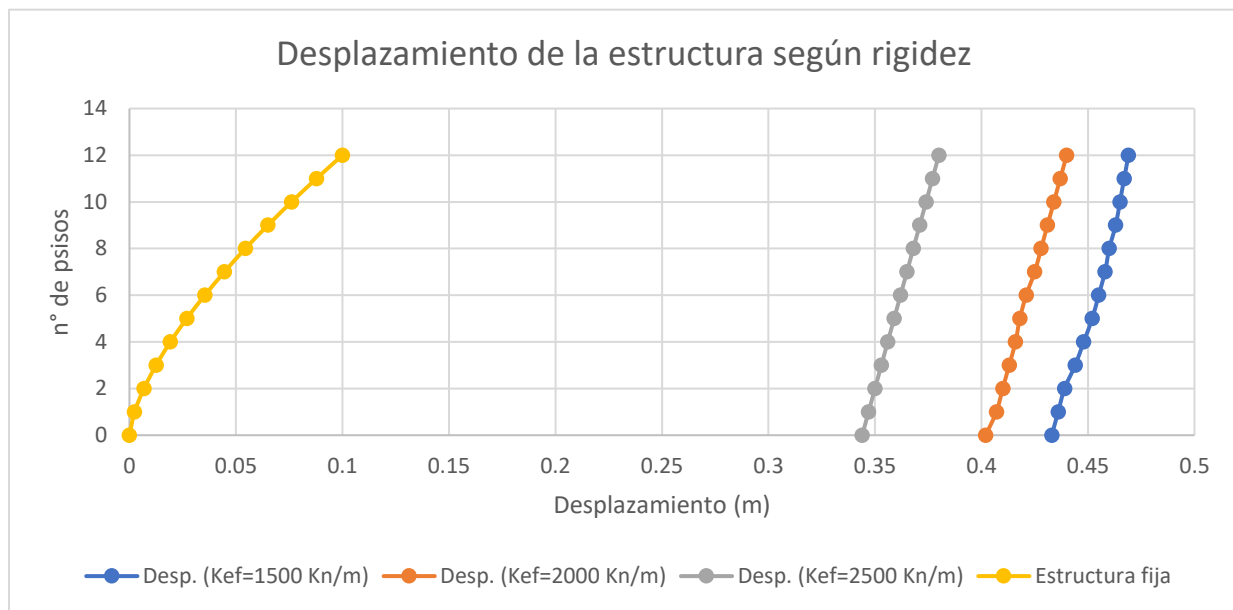


Gráfica 2. Distribución de cortantes

La gráfica muestra de manera clara la relación inversa entre la rigidez de los aisladores sísmicos y la reducción del cortante basal en comparación con una estructura de base fija. Se observa que al incorporar aisladores con rigidez baja ($K_{ef} = 152.91$ tonf/m), se logra una reducción significativa del cortante basal, alcanzando un valor de 842.8 tonf, lo que representa una disminución de aproximadamente el 60% respecto al sistema con base fija. A medida que se incrementa la rigidez de los aisladores, la eficiencia en la reducción del cortante disminuye progresivamente. Con una rigidez intermedia ($K_{ef} = 203.87$ tonf/m), el cortante se reduce a 1158.85 tonf, mientras que con la mayor rigidez evaluada ($K_{ef} = 254.84$ tonf/m), el cortante alcanza los 1474.9 tonf.

Este comportamiento es coherente con los principios del aislamiento sísmico, donde una menor rigidez permite mayores desplazamientos y una mayor desaceleración entre el movimiento del suelo y la estructura, logrando una significativa reducción de la demanda sísmica. En cambio, una mayor rigidez tiende a acoplar más el movimiento de la estructura con el del terreno, disminuyendo la efectividad del aislamiento.

Desplazamientos máximos en el edificio



Gráfica 3. Desplazamientos máximos en el edificio. Fuente: Elaboración propia.

La gráfica de desplazamientos máximos por piso permite visualizar claramente las diferencias en el comportamiento estructural entre una estructura con base fija y una estructura con base aislada mediante aisladores sísmicos elastoméricos, considerando tres valores de rigidez efectiva (K_{ef}).

En el caso de la estructura con base fija, el desplazamiento se incrementa progresivamente desde la base (0 m) hasta alcanzar un valor máximo de 0.10 m en el último piso. Esta distribución refleja la deformación acumulada a lo largo de la altura de la edificación, generando mayores derivas y esfuerzos en cada entrepiso.

Por otro lado, las estructuras con base aislada presentan desplazamientos iniciales elevados en la base (0.344 a 0.46 m), con incrementos mínimos en los pisos superiores. Esto indica que la mayoría del movimiento se concentra en los aisladores, lo cual es una característica esperada y deseada en estos sistemas, ya que permite reducir significativamente la demanda sísmica en la superestructura.

Asimismo, se observa que el incremento en la rigidez del sistema aislado conlleva a una reducción en el desplazamiento máximo. Por ejemplo, para una rigidez de 152.91 tonf/m ($T = 3.8$ s), el desplazamiento máximo es de 0.46 m, mientras que para 254.84 tonf/m ($T = 2.5$ s) es de 0.38 m. Esta reducción está asociada a una mayor oposición al movimiento en la base, lo cual puede ser beneficioso desde el punto de vista del control del desplazamiento, pero también implica una menor eficiencia en el aislamiento sísmico.

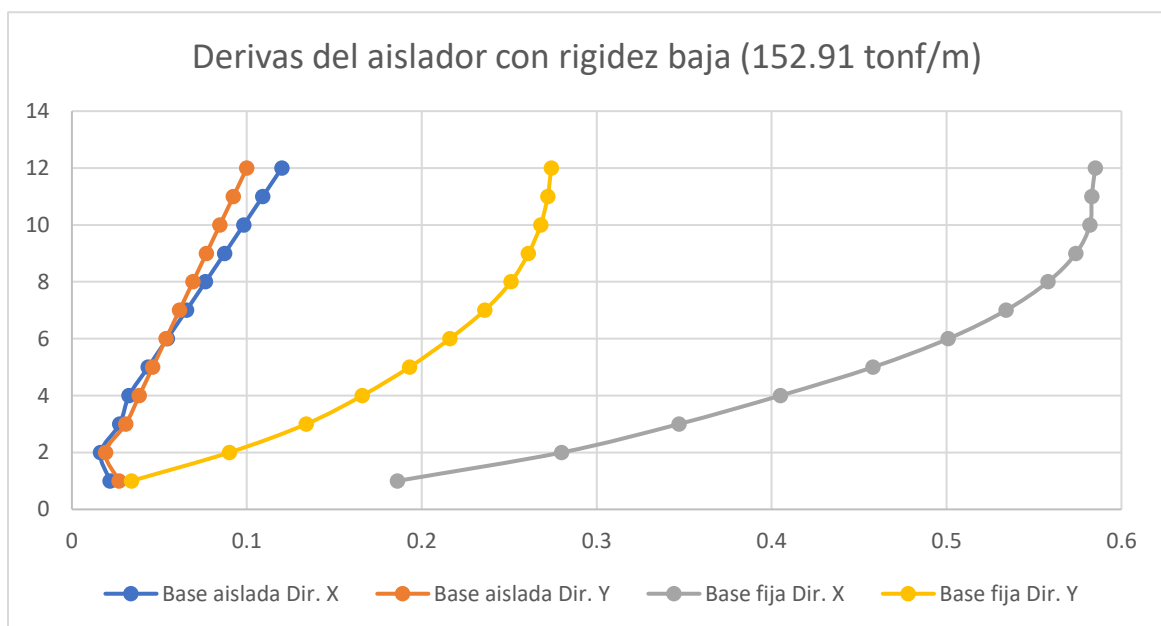
Se logra evidenciar que los aisladores logran desacoplar el movimiento del terreno de la superestructura, permitiendo un comportamiento más rígido en altura y reduciendo significativamente las derivas. La selección adecuada de la rigidez debe equilibrar el control del desplazamiento máximo con la eficiencia del aislamiento.

Límites para las derivas

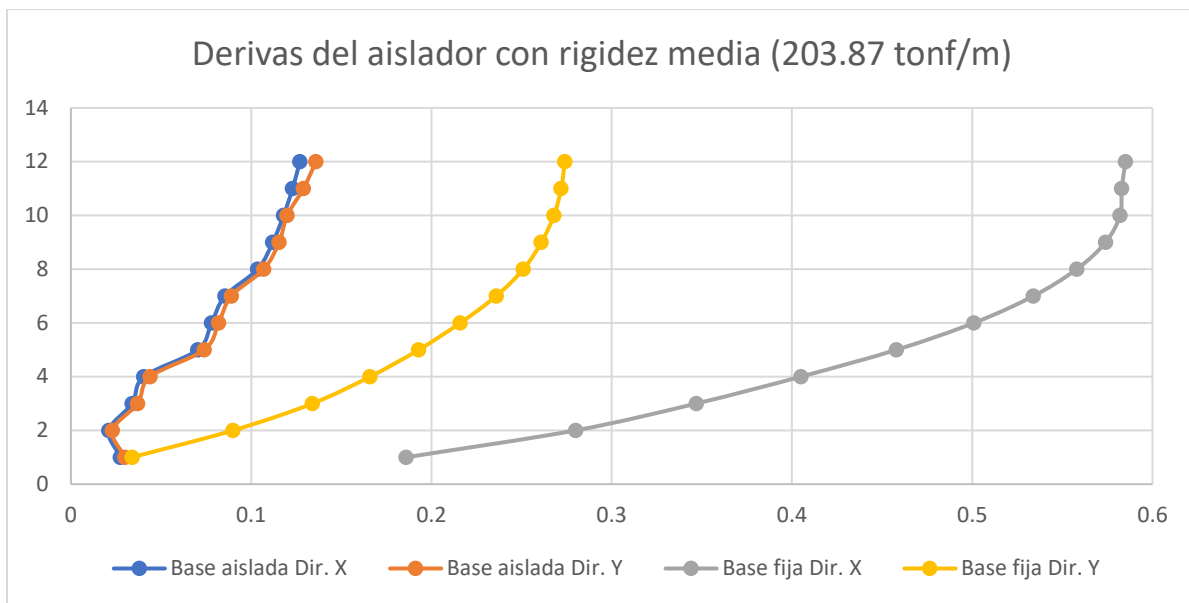
El límite de deriva para edificaciones con aislamiento de base está definido como $0.015 h_{sx}$, siendo h_{sx} la altura de entrepiso. Este límite es más estricto que el usado en edificaciones con base fija por dos razones:

1. El sismo de diseño asociado a este límite tiene un periodo de retorno de 2475 años.
2. El desempeño esperado para cualquier estructura aislada debe ser el mismo (sin importar su uso). Este límite de deriva, aunque es elevado, indica un nivel de desempeño mejor al de edificaciones con base fija, ya que con dicho valor se espera un desempeño cercano al de ocupación inmediata (IO) para el sismo máximo esperado (fuerte).

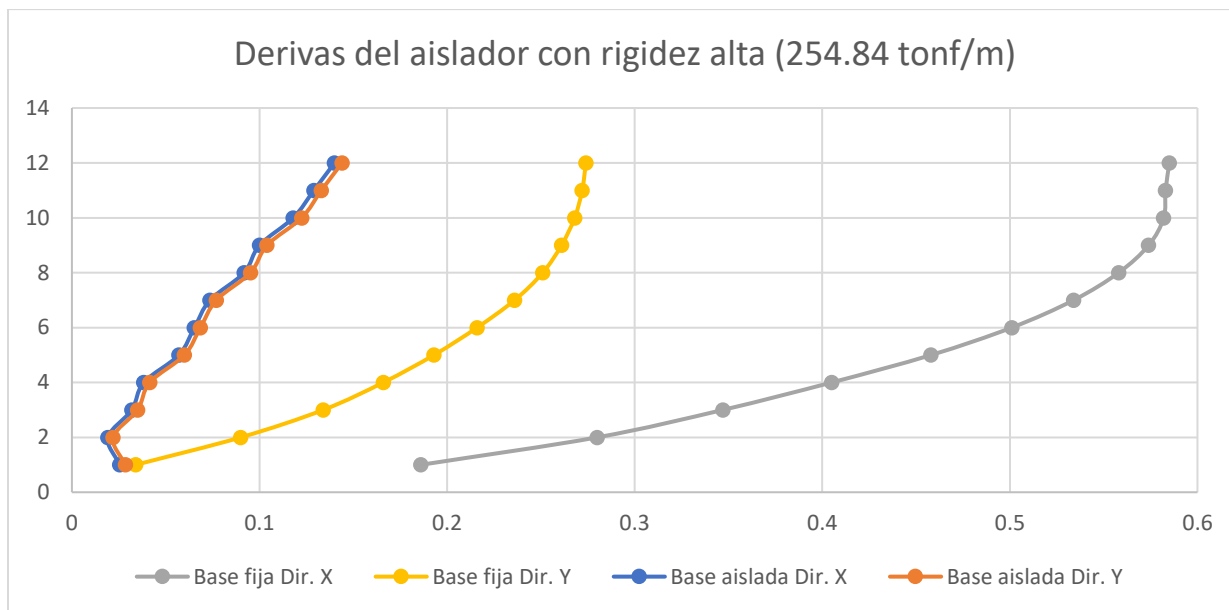
las bajas derivas en edificios de base aislada reflejan una capacidad sobresaliente para limitar daños en elementos estructurales y no estructurales durante eventos sísmicos. En el análisis de desempeño de esta estructura con aislamiento sísmico, la deriva máxima alcanzada en condiciones de MCE (Máximo Terremoto Considerado) es de apenas 0.12%, ubicándola en un nivel de desempeño **totalmente operacional**. Esto permite la ocupación inmediata de la edificación tras el sismo, sin necesidad de reparaciones mayores, minimizando interrupciones.



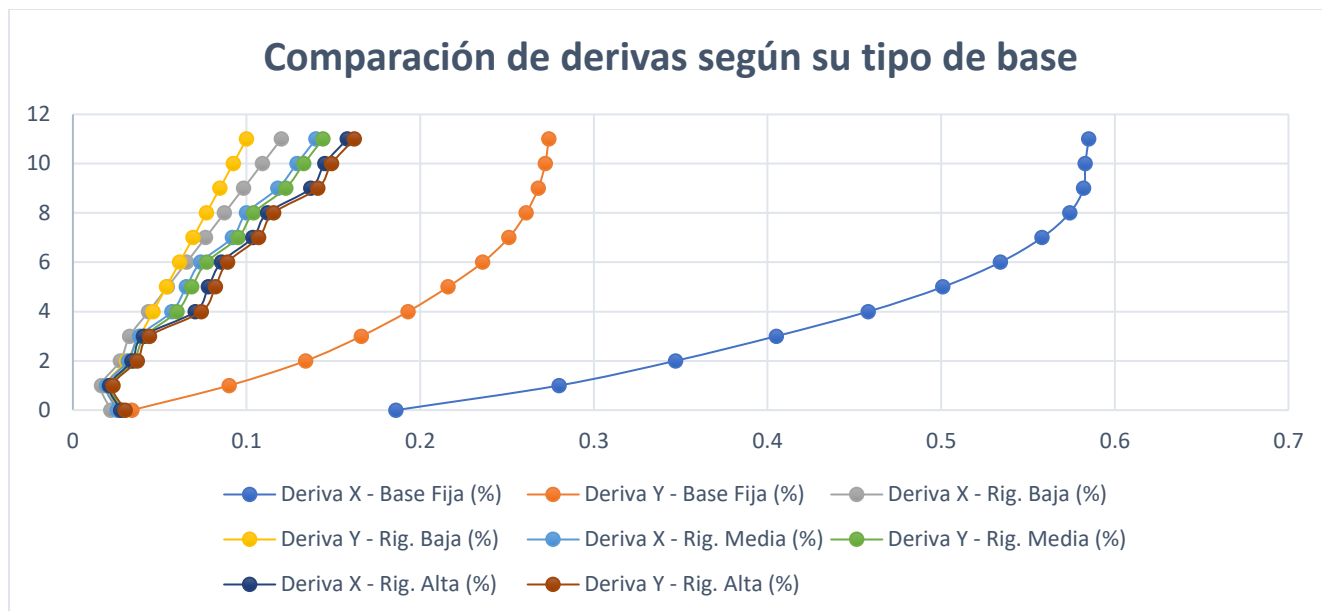
Gráfica 4. Derivas de entrepiso con la estructura aislada (rigidez baja), en comparación con las derivas de la base fija. Fuente: Elaboración propia



Gráfica 5. Derivas de entrepiso con la estructura aislada (rigidez media), en comparación con las derivas de la base fija. Fuente: Elaboración propia



Gráfica 6. Derivas de entrepiso con la estructura aislada (rigidez alta), en comparación con las derivas de la base fija. Fuente: Elaboración propia



Gráfica 7. Compilado de derivas de entrepiso de la estructura con base fija y con su base aislada. Fuente: Elaboración propia.

En las gráficas presentadas se comparan las derivas entrepiso en las direcciones X e Y para una estructura de 12 niveles, considerando cuatro condiciones distintas de soporte: base fija (sin aislamiento) y base aislada con tres niveles de rigidez de los aisladores sísmicos (baja, media y alta).

Los resultados muestran que, en general, la implementación de aisladores sísmicos genera una reducción significativa en las derivas entrepiso, especialmente en los pisos superiores. Este comportamiento se alinea con el objetivo fundamental de los sistemas de aislamiento sísmico: desacoplar el movimiento del terreno del movimiento de la superestructura, disminuyendo así las deformaciones internas y daños estructurales.

Para la estructura con base fija, se observa un incremento progresivo de la deriva desde el primer piso hasta el último, alcanzando valores máximos del orden de 0.68%. Estos valores pueden considerarse elevados, especialmente si se comparan con los límites establecidos por normas sísmo resistentes como la NSR-10 o ASCE 7, que sugieren mantener las derivas entrepiso dentro del 1 % o menores, dependiendo del uso de la edificación.

En contraste, para los casos con aisladores sísmicos, las derivas son sustancialmente menores. En la configuración con rigidez baja (152.91 kN/m), las derivas máximas en los últimos niveles fueron de aproximadamente 0.12 % en X y 0.10 % en Y, lo que representa una reducción de hasta 80–85 % respecto a la estructura con base fija. En los casos con rigidez media (203.87 kN/m) y alta (254.84 kN/m), aunque las derivas son ligeramente mayores que en la rigidez baja, se mantienen en un rango muy favorable, con valores inferiores al 0.16–0.18 % en ambos sentidos.

Este comportamiento no muestra una variación lineal respecto a la rigidez: a medida que la rigidez de los aisladores aumenta, se reduce el efecto amortiguador del sistema, permitiendo una transmisión mayor de la aceleración a la estructura y, por ende, un leve incremento en las derivas. Sin embargo, en todos los casos con aislamiento, las derivas se mantienen muy por debajo de los valores presentados por la estructura fija, lo que demuestra la eficiencia del sistema de aislamiento sísmico, incluso cuando se utilizan aisladores más rígidos.

Por último, el análisis comparativo de tres niveles de rigidez en aisladores sísmicos elastoméricos evidencia que la implementación de estos dispositivos permite una reducción significativa en la demanda sísmica transmitida a la superestructura.

Los aisladores de **rigidez baja (152.91 kN/cm)** ofrecen el mejor desempeño, al maximizar la flexibilidad del sistema y reducir eficientemente las derivas entrepiso, manteniéndose en rangos aceptables (inferiores al 0.2 %). La **rigidez media (203.87 kN/cm)** representa una opción intermedia con comportamiento aceptable, mientras que los aisladores de **alta rigidez (254.84 kN/cm)** tienden a reducir la efectividad del aislamiento, al aumentar las derivas y transmitir mayores esfuerzos a la estructura.

En conclusión, la rigidez baja es la opción más recomendable para este tipo de edificación, ya que permite un desacople efectivo entre la estructura y el movimiento del terreno, optimizando el desempeño sísmico sin comprometer la estabilidad global.

Análisis de factibilidad económica de la implementación de aisladores sísmicos

La implementación de aisladores sísmicos de base en edificaciones de mediana y gran altura ha demostrado ser una estrategia efectiva para mejorar el desempeño estructural ante eventos sísmicos. No obstante, su viabilidad económica debe evaluarse considerando tanto los costos de adquisición e instalación como los beneficios a largo plazo en términos de reducción de daños y mantenimiento. En este capítulo, se presenta un análisis técnico-económico detallado sobre la implementación de aisladores sísmicos elastoméricos con núcleo de plomo (LRB).

Proyecto 26 - Aralia de Castilla + Urb Interior	
Control Por Capítulos	
Capítulo	Presupuestado
COSTOS DIRECTOS	
1 Preliminares	82,922,727.18
2 Movimiento de Tierras	61,994,754.20
3 Cimentacion	536,920,914.90
4 Estructura	1,652,538,166.15
5 Mamposteria	409,323,526.91
6 Pañetes	478,251,843.79
7 Cubierta	44,293,386.58
8 Impermeabilizaciones	67,051,864.15
9 Enchapes	50,581,130.67
10 Pisos (Acabados)	460,759,795.16
11 Pintura	333,012,675.48
12 Acabados	222,601,162.61
13 Aparatos, griferias y accesorios	230,326,877.50
14 Carpinteria Madera	468,775,488.38
15 Carpinteria Metalica / Aluminio	604,796,279.68
16 Inst. Hidraulicas y Sanitarias	969,340,477.30
17 Inst. Electrica y telefonica	580,238,773.02
18 Aparatos especiales	154,827,688.29
19 Aseos y Resanes	102,114,674.30
20 Equipos y herramientas	281,793,705.54
21 Gastos generales	145,021,136.14
22 Personal de administracion	418,660,905.08
25 Imprevistos	21,375,696.32
98 INCREMENTOS	59,185,810.25
Total COSTOS DIRECTOS	8,436,787,456.76
Totales	8,436,787,456.76

Tabla 10. Costos totales de la edificación. Fuente: Elaboración propia.

Costos de Implementación

Para este análisis, se considera que cada aislador elastomérico con núcleo de plomo (LRB) tiene un costo de **\$8,000 USD**. La edificación requiere la instalación de **18 aisladores**, por lo que el costo total de adquisición se calcula como:

$$C_{total} = N * C_{uni. total} = 18 * 8000 C_{total} = 144000 USD$$

Conversión a pesos colombianos

Tomando un tipo de cambio de referencia de **1 USD = 4,100 COP**, el costo total en pesos colombianos es:

$$C_{total}(COP) = 144000 * 4100 C_{total COP} = 590.400.000 COP$$

Comparación con el Costo Total de la Edificación

El costo total de la edificación sin aisladores es de **8,436,787,456 COP**. La relación entre el costo de los aisladores y el costo total de la edificación se calcula como:

$$R = \left(\frac{C_{total}(COP)}{C_{edificio}(COP)} \right) * 100$$

$$R = \left(\frac{590.400.000}{8.436.787.456} \right) * 100 = 6.99 \%$$

Esto indica que la implementación de los aisladores representa aproximadamente el **6.66%** del costo total de la edificación.

Beneficios Económicos y Comparación con Alternativas Convencionales

Estudios han demostrado que el uso de aisladores sísmicos puede reducir entre un 50% y 90% los costos de reparación estructural tras un evento sísmico severo. Para una edificación de estas características, sin aislamiento, los costos de reparación podrían ascender al 10% - 25% del costo total de la estructura, es decir, entre 843 y 2,109 millones de pesos colombianos. *Bohórquez y Gómez (2009) encontraron que, aunque el costo inicial de construcción aumenta cerca del 30% por los diafragmas rígidos y aisladores, se reduce significativamente el uso de concreto (15%) y acero (29%), mejorando el desempeño sísmico y disminuyendo costos de reparación a largo plazo.*

López (2016) mostró que, pese al mayor costo inicial, las edificaciones aisladas reducen en un 62% los costos de reparación post-sísmica y la demanda de ductilidad, lo que hace rentable el aislamiento sísmico a largo plazo.

Si se implementan los aisladores, los costos de reparación podrían reducirse a un 5% - 10% del costo total de la edificación, es decir, entre 421 y 843 millones de pesos, lo que representa un ahorro potencial de hasta 1,266 millones de pesos. Rodríguez, Sánchez y Díaz (2018) concluyeron que, aunque la inversión inicial en aislamiento sísmico para hospitales puede ser un 35% mayor, el retorno de la inversión ocurre entre 7 y 10 años gracias a la protección de equipos y la continuidad operativa tras un sismo.

El análisis económico demuestra que la implementación de aisladores sísmicos representa un costo del 6.99% del presupuesto total de la edificación. No obstante, los beneficios en términos de reducción de daños estructurales, menores costos de reparación post-sismo y posibles ahorros en seguros hacen que esta inversión sea altamente recomendable. La relación costo-beneficio justifica la aplicación de esta tecnología para mejorar la resiliencia estructural en Bogotá, una zona de amenaza sísmica intermedia.

Limitaciones del estudio y recomendaciones para trabajos futuros

Aunque en el presente trabajo se utilizaron métodos de análisis estructural lineales, acordes con el nivel de formación de pregrado, es importante destacar que los aisladores sísmicos de base presentan un comportamiento altamente no lineal, caracterizado por respuestas histeréticas ante sollicitaciones dinámicas.

Este comportamiento no puede ser completamente capturado mediante análisis estáticos o dinámicos lineales, los cuales asumen propiedades constantes y lineales en los materiales y elementos estructurales. En consecuencia, los resultados obtenidos deben interpretarse como una aproximación dentro de un marco simplificado, adecuado para los objetivos académicos del presente trabajo.

Para representar de manera más precisa la respuesta estructural de sistemas base aislados, es recomendable que en futuros estudios se implementen métodos de análisis no lineal, tales como el análisis pushover o el análisis dinámico no lineal en el tiempo (time-history). Estos métodos permiten incorporar modelos histeréticos que simulan la degradación de rigidez, la disipación de energía y la fluencia, aspectos críticos en el desempeño sísmico de estructuras aisladas.

Por tanto, se recomienda que investigaciones posteriores, con mayor profundidad técnica o a nivel de posgrado, incluyan este tipo de análisis para obtener una evaluación más realista del comportamiento estructural ante eventos sísmicos severos.

Conclusiones

El presente estudio se enfocó en analizar la efectividad y pertinencia de la implementación de sistemas de aislamiento sísmico de base en edificios de gran altura dentro del contexto urbano de Bogotá. Este análisis abarcó aspectos técnicos y normativos, con el objetivo de evaluar el impacto de dichos sistemas en la seguridad

estructural y la mitigación del riesgo sísmico en la región. El estudio se fundamentó en la comprensión profunda de los principios de ingeniería sísmica, incluyendo el comportamiento dinámico de estructuras, las características del suelo y la interacción suelo-estructura. Asimismo, se consideran las normativas y regulaciones locales, nacionales e internacionales pertinentes, que influyen en el diseño, construcción y mantenimiento de edificaciones con sistemas de aislamiento sísmico en Bogotá. Además, se examinó la experiencia internacional en la implementación de estos sistemas, con énfasis en casos de estudio relevantes que han demostrado su eficacia y rentabilidad. Se pretendió destacar los beneficios y desafíos asociados a cada contexto.

Según Martelli y colaboradores (2014), el costo de implementar sistemas de aislamiento sísmico de base varía significativamente según la normativa sísmica de cada país. En naciones como Italia, Rusia, China y Armenia, donde se permite una reducción en las fuerzas sísmicas actuantes, la implementación puede ser más económica. Por el contrario, en países como Japón, Estados Unidos, Colombia y Chile, donde el aislamiento sísmico se considera una medida de seguridad adicional, los costos pueden aumentar debido a las exigencias estructurales más estrictas. Esta diversidad normativa resalta la importancia de considerar el contexto regulatorio al evaluar la viabilidad económica de estos sistemas.

Estos estudios enfatizan la importancia de evaluar no solo los aspectos técnicos, sino también los económicos y regulatorios al considerar la implementación de sistemas de aislamiento sísmico de base en proyectos de construcción, especialmente en regiones vulnerables a eventos sísmicos.

- Los aisladores sísmicos empleados en nuestras estructuras están diseñados con materiales de alta amortiguación y propiedades viscoelásticas avanzadas, permitiendo una absorción y disipación eficiente de la energía sísmica. Gracias a su capacidad de fluencia controlada (Q_d), estos aisladores pueden manejar completamente las fuerzas inducidas por eventos sísmicos mínimos, evitando que las vibraciones se transfieran a la superestructura.

Mediante modelado computacional y simulaciones sísmicas, se ha confirmado que los aisladores mantienen la estabilidad de la estructura al disipar internamente las fuerzas dinámicas, garantizando que no haya movimientos significativos. La combinación de diseño sofisticado, validación técnica y materiales avanzados asegura que las estructuras equipadas con estos aisladores no sufrirán daños ni desplazamientos perceptibles durante sismos de baja intensidad, proporcionando una protección robusta y continua. Otras consideraciones que son importantes tener en cuenta y que benefician la implementación de dichos aisladores, son las siguientes:

1. Mayor seguridad para la población

El principal objetivo de los aisladores sísmicos es proteger la vida de las personas al reducir el riesgo de colapso de los edificios durante un terremoto. En una ciudad como Bogotá, donde la densidad poblacional es alta y muchas personas habitan o trabajan en edificios de gran altura, la instalación de aisladores sísmicos sería un avance crucial en términos de seguridad.

Los aisladores elastoméricos, al estar compuestos de capas alternadas de acero y caucho, permiten una flexibilidad que reduce la aceleración en los pisos superiores del edificio. Esto significa que los movimientos bruscos que generan lesiones o riesgos en los ocupantes de un edificio se ven amortiguados. En edificaciones críticas, como hospitales, escuelas y centros de atención de emergencias, esta tecnología es particularmente valiosa, ya que permite que estos edificios sigan operando inmediatamente después de un sismo, asegurando una rápida respuesta en situaciones de emergencia.

Además, en un contexto más amplio, la adopción de esta tecnología en áreas urbanas densamente pobladas podría generar una sensación de seguridad generalizada entre la población, reduciendo la ansiedad ante la posibilidad de terremotos y generando una mayor confianza en la infraestructura de la ciudad.

2.Reducción de costos en reparaciones

Una de las ventajas más significativas de los aisladores sísmicos de base es su capacidad para reducir de manera considerable los daños estructurales en los edificios. Las edificaciones tradicionales, diseñadas sin aislamiento sísmico, tienden a sufrir deformaciones y fracturas cuando son sometidas a movimientos telúricos severos. Esto da lugar a costos elevados en reparaciones estructurales y, en muchos casos, a la necesidad de demoler y reconstruir.

En contraste, los edificios equipados con aisladores sísmicos están diseñados para "moverse" junto con el suelo, lo que disminuye drásticamente el impacto de las fuerzas sísmicas. Esto no solo protege las estructuras en sí mismas, sino que también reduce los daños internos como grietas en paredes, suelos, tuberías y sistemas eléctricos. Con el tiempo, los ahorros económicos derivados de la implementación de esta tecnología pueden ser inmensos, sobre todo en ciudades con alta actividad sísmica como Bogotá.

Un ejemplo claro de esta ventaja es el caso del World Trade Center en Nueva York, que ha utilizado sistemas de aislamiento sísmico. Aunque esta estructura fue expuesta a terremotos, las tecnologías avanzadas de mitigación sísmica contribuyeron a minimizar los daños y evitar reparaciones costosas. Este modelo puede servir de inspiración para Bogotá y otras ciudades colombianas, que podrían beneficiarse a largo plazo al evitar altos costos en rehabilitación de edificios tras eventos sísmicos.

3. Conservación de patrimonio arquitectónico

Bogotá y muchas ciudades colombianas albergan una gran cantidad de edificaciones históricas y patrimoniales que forman parte del legado cultural del país. Estas estructuras, sin embargo, suelen estar construidas con técnicas y materiales que no fueron diseñados para soportar terremotos de gran magnitud. En este sentido, los aisladores sísmicos ofrecen una solución única para proteger tanto el valor histórico como la integridad física de estos edificios.

El uso de aisladores de base en construcciones patrimoniales permite que los movimientos sísmicos no se transmitan directamente a las paredes y techos de estas

edificaciones, preservando su estructura original. A diferencia de las técnicas tradicionales de refuerzo, que pueden alterar el aspecto o los materiales originales de un edificio, los aisladores de base no requieren cambios estéticos o arquitectónicos significativos, lo que asegura que el valor histórico y cultural del edificio se mantenga intacto.

4. Avance en la ingeniería nacional y competitividad internacional

La adopción de tecnologías avanzadas como los aisladores sísmicos posicionaría a Colombia a la vanguardia de la ingeniería civil en América Latina. Si bien el uso de aisladores de base ya es común en países con altos niveles de actividad sísmica como Japón, Chile y los Estados Unidos, en Colombia su implementación a gran escala sería un avance significativo. Esto no solo mejoraría la seguridad de las infraestructuras del país, sino que también impulsaría la investigación y el desarrollo en el ámbito de la ingeniería sísmica.

Además, esta tecnología podría tener un impacto positivo en la competitividad internacional de Colombia. Las ciudades que implementan medidas de seguridad estructural avanzadas se vuelven más atractivas para la inversión extranjera, ya que ofrecen un entorno más seguro y estable para el desarrollo económico. Empresas y desarrolladores internacionales verían a Bogotá y otras ciudades colombianas como lugares confiables para construir, sabiendo que sus infraestructuras estarán protegidas frente a desastres naturales.

Finalmente, el impulso a la investigación y desarrollo de tecnologías de aislamiento sísmico también podría abrir puertas para que ingenieros colombianos colaboren en proyectos internacionales, llevando el conocimiento y la experiencia adquirida en el país a otras regiones del mundo.

Referencias Bibliográficas

- ASCE 7-16, American Society of Civil Engineers. (2016). Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures.
- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. (2010). Reglamento Colombiano de construcción sismo resistente NSR-10.
- Benavente, J., & Traverso, I. (2013). Comparación del análisis y diseño de un edificio de concreto armado de siete pisos con y sin aislamiento en la base. Facultad de Ciencias e Ingeniería. https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/20.500.12404/5990/BENAVENTE_JOSE_TRAVERSO_IVAN_COMPARACION_ANALISI_DISE%c3%91O.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Bohórquez, J. A., & Gómez, L. M. (2009). Análisis estructural y económico de edificios de 30 pisos en la ciudad de Cartagena mediante análisis estático y empleando aisladores sísmicos [Tesis de pregrado, Universidad de Cartagena]. <https://repositorio.unicartagena.edu.co/12345>
- González Gordon, S. (2020). Evaluación de la implementación de aisladores sísmicos en edificaciones residenciales [Tesis de grado en Ingeniería Civil]. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/78641>
- Kelly, J. M., & Konstantinidis, D. A. (2011). Mechanics of Rubber Bearings for Seismic and Vibration Isolation. New Delhi: John Wiley & Sons Ltda.
- López, C. F. (2016). Comparación económica de la demanda de ductilidad en edificaciones con aislamiento sísmico [Tesis de pregrado, Universidad EIA]. <https://repository.eia.edu.co/2074>
- López, F. G., Suárez, N. B., & Guerrero, L. R. (2014, junio). Experiencias sobre aislamiento sísmico en Colombia. VI Congreso ACHE, Madrid. <https://www.researchgate.net/publication/317600759>
- Martelli, A., Clemente, P., Di Stefano, A., Forni, M., & Salvatori, A. (2014). Recent development and application of seismic isolation and energy dissipation and

conditions for their correct use. En *Perspectives on European Earthquake Engineering and Seismology* (pp. 449–488). Springer Open.

- Oviedo, J. A., & Duque, M. d. (2006). Sistemas de control de respuesta sísmica en edificaciones. *Revista EIA*, 3(4), 105–120. <https://doi.org/10.24050/reia.v3i6.163>
- Oviedo, J. A., & Duque, M. d. (2009). Situación de las técnicas de control de respuesta sísmica en Colombia. *Revista EIA*, 113–124.
- Piscal-Arévalo, J., & López-Almansa, F. (2018). Propuesta para la futura norma de aislamiento sísmico de edificaciones en Colombia. Universidad Nacional de Colombia – Facultad de Minas. <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/130770/72296-409143-1-PB.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Rodríguez, P., Sánchez, A., & Díaz, J. (2018). Evaluación económica de sistemas de aislamiento sísmico en infraestructura hospitalaria de Bogotá [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia].
- Rui-jun Zhang, & Ai-qun, L. (2020). Estudio experimental sobre la dependencia de la temperatura de las propiedades mecánicas de cojinetes de caucho de alto rendimiento a escala. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S135983681932654X>

Referencias de Tablas

- Tabla 1. Oviedo, J. A., & Duque, J. A. (2006). Aislamiento sísmico en edificaciones: una herramienta para la mitigación del riesgo. *Ingeniería e Investigación*, 26(2), 112–119. https://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1794-12372006000200010
- Tabla 2. Sociedad Colombiana de Geotecnia (SCG). (2009). NSR-09 — Capítulo A.2 — Zonas de amenaza sísmica y movimientos sísmicos de diseño. <https://www.scg.org.co/A-02-NSR-09%20edic%20para%20AIS-100.pdf>
- Tablas 3 y 4. Instituto Distrital de Gestión de Riesgos y Cambio Climático [IDIGER]. (2020). Modelación del riesgo sísmico en Bogotá D.C.

https://www.idiger.gov.co/documents/20182/71946/Modelacion_Riesgo_Sismico.pdf

- Tabla 7. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC). (2010). NSR-10 — Título B: Cargas. https://www.uptc.edu.co/export/sites/default/facultades/f_ingenieria/pregrado/civil/documentos/NSR-10_Titulo_B.pdf

Referencias de Figuras

- Figuras 1, 2 y 3. Oviedo, J. A., & Duque, J. A. (2006). Aislamiento sísmico en edificaciones: una herramienta para la mitigación del riesgo. *Ingeniería e Investigación*, 26(2), 112–119. https://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1794-12372006000200010
- Figura 4. Grupo Grasa. (2020, mayo 15). ¿Cómo funcionan los aisladores sísmicos de los edificios? <https://grupograsa.es/como-funcionan-los-aisladores-sismicos-de-los-edificios/>
- Figura 6. Martelli, A., Clemente, P., Di Stefano, A., Forni, M., & Salvatori, A. (2014). Recent development and application of seismic isolation and energy dissipation and conditions for their correct use. Springer Open.
- Figura 7. Boyacá Visible. (2023, septiembre 19). Mapa de amenaza sísmica en Colombia, ¿Dónde estamos en mayor riesgo? <https://boyacavisible.com/mapa-de-amenaza-sismica-en-colombia-donde-estamos-en-mayor-riesgo/>
- Figura 8. Instituto Distrital de Gestión de Riesgos y Cambio Climático (IDIGER). (2018). Modelación del riesgo sísmico en edificaciones para la ciudad de Bogotá — Versión 2018 SISMARB. https://www.idiger.gov.co/documents/20182/71946/Modelacion_Riesgo_Sismico.pdf
- Figuras 13 y 14. Aranguren Sedano, A. (2012). Análisis comparativo de las implicaciones económicas entre la NSR-98 y NSR-10 (Caso de estudio en la ciudad de Bogotá) [Trabajo de grado, Pontificia Universidad Javeriana].

<https://apidspace.javeriana.edu.co/server/api/core/bitstreams/bf48cf90-2e3f-45b5-8110-7cf33702b057/content>