



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE CUENCA

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

**CÁLCULO ESTRUCTURAL DE UNA EDIFICACIÓN CON AISLAMIENTO
SÍSMICO EN EL CENTRO HISTÓRICO DE LA CIUDAD DE CUENCA**

Trabajo de titulación previo a la obtención del
título de Ingeniero Civil

AUTOR: BRYAM ORLANDO ROJAS SARMIENTO

TUTOR: ING. MAURO ANDRÉS VALLEJO BOJORQUE, MSC.

Cuenca - Ecuador

2024

**CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN**

Yo, Bryam Orlando Rojas Sarmiento con documento de identificación N° 0107149874, manifiesto que:

Soy el autor y responsable del presente trabajo; y, autorizo a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Cuenca, 01 de febrero del 2024

Atentamente,

A handwritten signature in blue ink that reads "Bryam Rojas". The signature is written in a cursive style with a horizontal line crossing through the middle of the letters.

Bryam Orlando Rojas Sarmiento

0107149874

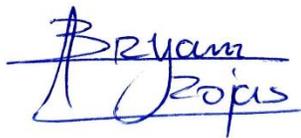
**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Yo, Bryam Orlando Rojas Sarmiento con documento de identificación N° 0107149874, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del Proyecto técnico: “Cálculo estructural de una edificación con aislamiento sísmico en el centro histórico de la ciudad de Cuenca”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Civil, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 01 de febrero del 2024

Atentamente,



Bryam Orlando Rojas Sarmiento

0107149874

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Mauro Andrés Vallejo Bojorque con documento de identificación N° 0105736490 docente de la Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: CÁLCULO ESTRUCTURAL DE UNA EDIFICACIÓN CON AISLAMIENTO SÍSMICO EN EL CENTRO HISTÓRICO DE LA CIUDAD DE CUENCA, realizado por Bryam Orlando Rojas Sarmiento con documento de identificación N° 0107149874 obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Proyecto técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 01 de febrero del 2024

Atentamente,



Ing. Mauro Andrés Vallejo Bojorque

0105736490

Dedicatoria

A mis padres, mi familia y amigos,

Quiero expresar mi profundo agradecimiento a cada uno de ustedes por haber sido mi soporte incondicional a lo largo de mi trayectoria académica. A mis padres, quienes han sido mi inspiración y guía constante, les debo todo lo que he logrado. Su sacrificio, amor y apoyo ha sido la fuerza que me ha impulsado a alcanzar mis metas.

A mi familia y amigos, quienes han estado presentes en cada paso del camino, su aliento y compañía han sido invaluable. Cada palabra de ánimo y gesto de apoyo ha significado el mundo para mí.

Este logro es el resultado de vuestro amor y apoyo incondicional. Gracias por creer en mí, por motivarme y por ser parte fundamental en este camino hacia el éxito.

Con gratitud eterna,

Bryam Rojas Sarmiento

Resumen

El presente proyecto aborda una comparativa centrada en el cálculo estructural de dos tipos de edificaciones: una estructura convencional y otra equipada con aislación sísmica dentro del territorio denominado Centro Histórico en la ciudad de Cuenca, Ecuador. La ubicación de este proyecto es ideal para el análisis sismorresistente de una estructura, ya que, se encuentra en una zona sísmica activa, con una historia significativa de eventos telúricos

En la primera fase de la investigación, se realiza un análisis detallado de la estructura convencional, utilizando métodos tradicionales de diseño estructural, definiendo materiales y secciones definitivas. Posteriormente, se implementa un diseño alternativo incorporando tecnologías de aislación sísmica con el fin de mejorar la capacidad de respuesta y reducir los efectos negativos de los movimientos telúricos.

La comparativa entre ambas estructuras se lleva a cabo mediante criterios específicos, como la capacidad de disipación de energía y la preservación de la integridad estructural. Se abordarán, igualmente, aspectos económicos y constructivos para proporcionar una visión integral de la viabilidad y eficiencia de cada sistema.

Los resultados obtenidos demostraron reducciones significativas en las derivas de piso, con un promedio del 83% en las estructuras aisladas. Además, se observó una mejora sustancial en el amortiguamiento, con una disminución del 60% en las vibraciones sísmicas, y registrando un aumento significativo del período fundamental de la estructura y logrando la disminución de la aceleración espectral máxima.

Este proyecto resalta la eficacia del aislamiento sísmico en contraste con las estructuras convencionales. Aunque la implementación de aislamiento sísmico implica un aumento en el

presupuesto de construcción, que varía entre un 3% y un 10%, los beneficios sustanciales en términos de seguridad y resiliencia estructural sugieren que este incremento presupuestario es justificado y necesario para mitigar los riesgos sísmicos de manera efectiva.

Palabras clave: *Aislamiento sísmico; Estructura Convencional; Centro Histórico; Diseño sismorresistente.*

Abstract

This project deals with a comparative study focused on the structural design of two types of buildings: a conventional structure and another equipped with seismic isolation within the territory known as the Historic Center in the city of Cuenca, Ecuador. The location of this project is ideal for the seismic-resistant analysis of a structure, since it is located in an active seismic zone, with a significant history of seismic events.

In the first phase of the research, a detailed analysis of the conventional structure is carried out, using traditional structural design methods, defining materials and definitive sections. Subsequently, an alternative design is implemented incorporating seismic isolation technologies to improve the response capacity and reduce the negative effects of earthquake movements.

The comparison between the two structures is carried out using specific criteria, such as energy dissipation capacity and preservation of structural integrity. Economic and constructive aspects will also be addressed to provide a comprehensive view of the feasibility and efficiency of each system.

The results obtained showed significant reductions in floor drifts, with an average of 83% in the isolated structures. In addition, a substantial improvement in damping was observed, with a 60% decrease in seismic vibrations, and recording a significant increase in the fundamental period of the structure and achieving a decrease in the maximum spectral acceleration.

This project highlights the effectiveness of seismic isolation in contrast to conventional structures. Although the implementation of seismic isolation implies an increase in the construction budget, ranging from 3% to 10%, the substantial benefits in terms of safety and structural resilience suggest that this budget increase is justified and necessary to effectively mitigate seismic risks.

Keywords: *Seismic isolation; Conventional Structure; Historic Center; Seismic-resistant design.*

ÍNDICE

1. Introducción	14
2. Problemática	17
2.1 Antecedentes	17
2.2 Importancia y alcances	18
2.3 Delimitación	19
2.3.1 Localización	20
2.3.2 Características del terreno	20
2.3.3 Funcionalidad	21
2.3.4 Anteproyecto de la edificación	21
3. Objetivos	22
3.1 Objetivo General	22
3.2 Objetivos específicos	22
4. Fundamentos teóricos	22
4.1 Metodología sismorresistente	23
5. Marco metodológico	24
5.1 Diseño estructural con y sin aislación sísmica	24
5.2 Consideraciones para el cálculo estructural	25
5.2.1 Códigos de diseño y normativas de construcción	25
5.2.2 Criterios generales para el diseño estructural	28
5.2.2.1 Planos arquitectónicos preliminares	28
5.2.2.2 Estructuración y definición de ejes	28
5.2.2.3 Interacción suelo-estructura	29
5.2.3 Definición de materiales	29
5.2.4 Casos de carga	30
5.2.5 Combinaciones de carga	31
5.2.6 Predimensionamiento de elementos estructurales	32
5.2.6.1 Vigas	32
5.2.6.2 Columnas	33
5.2.6.3 Losas	33

5.2.7	Diseño sismorresistente.....	34
5.2.8	Consideraciones generales	34
5.2.8.1	Período fundamental de la estructura.....	35
5.2.8.2	Cargas sísmicas	36
5.2.8.2.1	Cortante Basal de diseño	37
5.2.8.2.2	Espectro elástico de diseño	37
5.2.8.3	Análisis modal y modos de vibración	40
5.2.9	Criterios de diseño	41
5.2.9.1	Fuerzas Axiales	41
5.2.9.2	Fuerzas Cortantes	42
5.2.9.3	Flexión y torsión.....	42
5.2.10	Replanteo de elementos estructurales	43
5.2.11	Comprobaciones	43
5.2.11.1	Cumplimiento de las solicitaciones de carga.....	43
5.2.11.2	Normativas y Códigos Actuales.....	43
5.2.11.3	Materiales y Resistencia	44
5.2.11.4	Deformaciones y Deflexiones.....	44
5.2.11.5	Actualización de Modelos Estructurales.....	44
5.2.11.6	Consideraciones económicas	44
5.3	Aislación sísmica.....	44
5.3.1	Normativas de diseño para aislación sísmica	45
5.3.2	Teoría de la aislación sísmica	45
5.3.2.1	Tipos de aisladores sísmicos y porcentaje de amortiguamiento.....	45
5.3.2.2	Amortiguamiento y control de daño	46
5.3.2.2.1	Amortiguamiento.....	47
5.3.2.2.2	Control de daño	47
5.3.2.3	Desplazamientos.....	48
5.3.2.4	Diagrama de histéresis.....	48
5.3.2.5	Costo preliminar	49
5.3.3	Recomendaciones para el uso de aislación sísmica	50
5.3.3.1	Tipo de suelo	50

5.3.3.2	Tipo de la estructura.....	50
5.3.4	Diseño de la aislación sísmica	51
5.3.4.1	Distribución de masa y rigidez	51
5.3.4.2	No linealidad del material	51
5.3.4.3	Propiedades de los materiales	51
5.3.4.4	Tipos de rigidez necesarias para el diseño del aislador	52
5.3.4.4.1	Rigidez horizontal requerida	52
5.3.4.4.2	Rigidez efectiva	52
5.3.4.4.3	Rigidez postfluencia.....	53
5.3.4.4.4	Rigidez elástica	53
5.3.4.4.5	Rigidez de los elementos	53
5.3.4.4.6	Rigidez total del sistema	54
5.3.4.5	Período de vibración de la estructura aislada.....	54
5.4	Criterios de comparación	54
6.	Resultados	55
6.1	Diseño arquitectónico preliminar	55
6.2	Definición de materiales	57
6.3	Casos de carga	58
6.4	Combinaciones de carga.....	59
6.5	Predimensionamiento de elementos estructurales.....	60
6.5.1	Vigas.....	60
6.5.2	Columnas	60
6.5.3	Losas.....	61
6.6	Diseño sismorresistente	61
6.6.1	Período fundamental	61
6.6.2	Cargas sísmicas	61
6.6.2.1	Cortante Basal de diseño	61
6.6.3	Espectro de diseño	62
6.6.4	Análisis Modal	62
6.7	Criterios de diseño.....	64
6.7.1	Desplazamientos.....	65

6.7.1.1	Derivas de piso máximos	66
6.7.2	Rediseño de elementos estructurales	68
6.7.2.1	Diseño definitivo de vigas	68
6.7.2.2	Diseño definitivo de Losas	69
6.7.2.3	Diseño definitivo de Columnas	71
6.7.3	Comprobaciones	72
6.8	Diseño de la aislación sísmica	76
6.8.1	Análisis de respuesta sísmica	78
6.8.2	Análisis de la rigidez vertical de cada elemento.....	79
6.8.3	Control de daño y disipación sísmica	80
6.9	Comparativa: Estructura convencional – Estructura con aislación sísmica ...	81
6.10	Fuerzas cortantes.....	82
6.11	Respuesta sísmica	83
6.11.1	Períodos de vibración	83
6.11.2	Derivas entrepiso	83
6.12	Control de daño	84
6.13	Viabilidad del uso de aislación sísmica con respecto a una estructura convencional	85
6.13.1	Ventajas de una estructura con aislación sísmica.....	85
6.13.2	Desventajas de una estructura con aislación sísmica.....	86
7.	Conclusiones.....	87
8.	Recomendaciones	89
9.	Referencias bibliográficas.....	90
10.	Anexos	93

1. Introducción

El centro histórico de la ciudad de Cuenca, Ecuador, Patrimonio Cultural de la Nación y de la Humanidad, (UNESCO, 2000) actualmente se encuentra propensa a un alto grado de peligrosidad sísmica (Jiménez-Pacheco et al., 2018). Las estructuras situadas en el centro histórico se han visto afectadas históricamente por la sismicidad, ya que fueron construidas con diversos materiales tales como el adobe, estructura de madera, teja, entre otros, los cuales se degeneran con el paso del tiempo aumentando la vulnerabilidad del riesgo sísmico (Jiménez-Pacheco et al., 2022).

Si bien es cierto que se debe tomar consideraciones e inspecciones sobre la reparación de las estructuras ya construidas, se puede y/o debe replantear un modelo de construcción y refuerzo de las nuevas estructuras a ser construidas en el centro histórico. Por lo cual, la implementación del aislamiento sísmico lograría disminuir la aceleración de la estructura respecto al suelo y la deriva entre pisos, dando como resultado el aumento del tiempo de amortiguamiento para disipar la energía total transmitida del suelo a la estructura. En términos de deriva entre pisos se tiene un impacto significativo en el comportamiento dinámico de las estructuras ya sean regulares o irregulares (Radkia et al., 2020).

Los aisladores sísmicos se agrupan en dos tipos, los elastoméricos y los de deslizamiento, los cuales tratan de solventar el objetivo principal de la construcción de estructuras sometidas a cargas dinámicas, salvaguardar vidas y aumentar la vida útil de la estructura incrementando los niveles de aceptación de daños después de un sismo. Los aisladores forman parte de la estructura y esta cambia las propiedades dinámicas en la cual las

deformaciones causadas por un siniestro se concentran únicamente en los aisladores que provocan un efecto de amortiguamiento.

Entre sus ventajas, destaca la capacidad de facilitar reparaciones y mantenimientos de manera más sencilla y económica en caso de posibles daños en la zona. Esta característica los convierte en una opción especialmente adecuada para la preservación y protección de estructuras patrimoniales. (Genatios & Lafuente, 2016).

Al agregar aisladores sísmicos a la estructura se debe procurar que la estructura trabaje como un cuerpo resistente a las cargas laterales (viento o sismos), evitando así las deformaciones y desplazamientos relativos y concentrándolos en aislador sísmico. Una ventaja es que permite disminuir la carga muerta del elemento, ya que la misma no estará sometidas a cargas sísmicas directas.

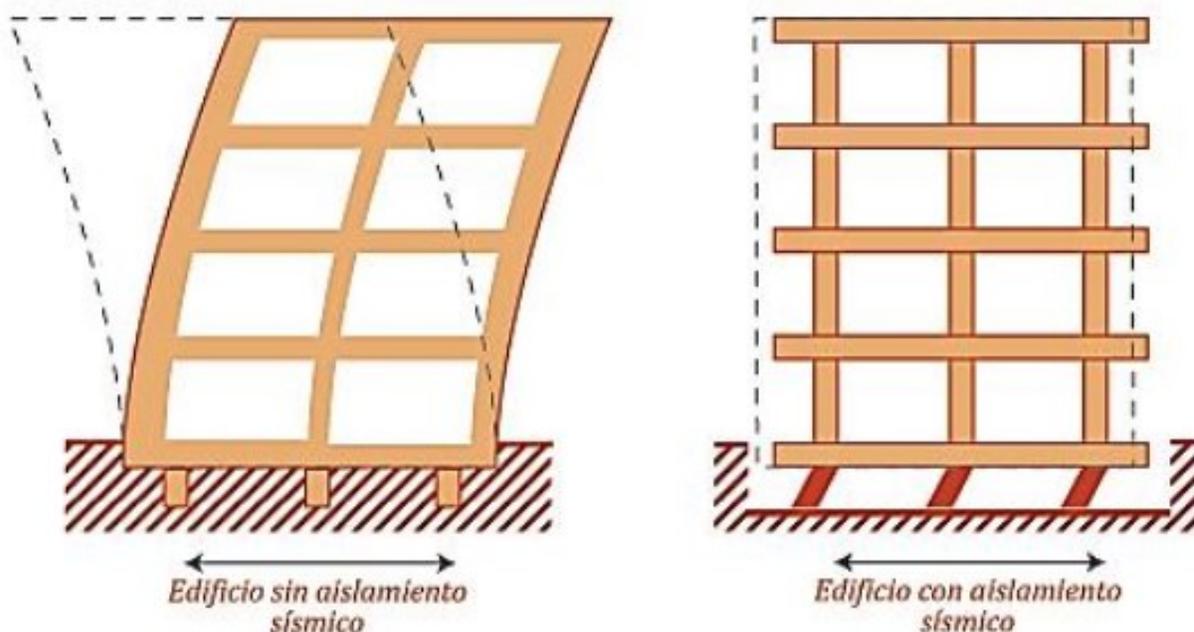


Figura 1: a) Edificación sin aislamiento sísmico y b) Edificación con aislamiento sísmico

(Genatios & Lafuente, 2016)

En Chile, debido a su gran historial de sismos y siniestros se encontró necesaria la implementación de una normativa para el diseño sismorresistente y para el diseño de estructuras aisladas sísmicamente, la norma NCh433 (Análisis y diseño de edificios con aislación sísmica), fue publicada en el año 2003. Chile actualmente tiene muy pocos vestigios de estructuras coloniales (Genatios & Lafuente, 2016).

En Ecuador la normativa para el diseño sismorresistente (NEC-SE-DS) no tiene un capítulo específico para el uso de disipación de energía mediante aislamiento sísmico; sin embargo, recomienda el uso de normativas extranjeras para el uso de disipación pasiva de energía, tales como Building Seismic Safety Council, BSSC del 2004, NEHRP, y FEMA 450 (NEC Normativa de construcción Sismo Resistente, 2015).

En relación con la tipología de estructuras, las casas y viviendas patrimoniales se han categorizado en relación con el tipo de material en el que la vivienda ha sido construida, empezando desde la estructura de madera con bloques de adobe y un revestimiento del mismo material, construcciones mixtas con ladrillo y tejas en su cubierta con estructura de madera. La información que se tiene con respecto a la tipología estructural del centro histórico es muy limitada; sin embargo, las linealidades expuestas por diferentes autores han confirmado que cerca del 100% del bien inmueble del centro histórico no se encuentra diseñado en base a un criterio sismorresistente. (Jiménez-Pacheco et al., 2022)

Para el análisis de una edificación actual se debe tener en cuenta las características que hacen de la estructura una construcción convencional o no convencional con respecto a las estructuras históricamente construidas en la ciudad de Cuenca situados dentro del entorno patrimonial.

2. Problemática

2.1 Antecedentes

Se plantea un cálculo y diseño estructural de una edificación ubicada en el centro histórico de la ciudad de Cuenca, el cual genera una problemática de estudio en cuanto a la relación arquitectónica-estructural aplicando una metodología de sismorresistencia con aislación sísmica. El diseño debe regirse a las linealidades impuestas por las normativas de construcción, así como a las pautas municipales al estar ubicado en el sector patrimonial de la ciudad.

La edificación debe ser diseñada respetando los parámetros que propone el municipio de la ciudad de Cuenca en cuanto a la geometría de la edificación y el mantenimiento del patrimonio, la misma que es de suma importancia, puesto que el terreno que se propone para la edificación ya cuenta con una vivienda patrimonial que rodea los 100 años de antigüedad. Por esta razón, se debe tener en cuenta el tipo de arquitectura del centro histórico y así no generar un impacto negativo al valor construido y del paisaje urbano visual del sector.

Históricamente la edificación actual se ha visto con problemas estructurales debido al paso del tiempo, al poco mantenimiento que se le ha dado y el desgaste del material con el que está construida la vivienda (adobe revestido). Asimismo, por la alta capacidad inundable que se tiene gracias a la topografía del terreno y el diseño erróneo del sistema de alcantarillado actual.

En el apartado de aislamiento sísmico no se tienen referencias de construcciones en el centro histórico y mucho menos una normativa ecuatoriana para la implementación de aislamiento sísmico, por lo cual la implementación de un método constructivo convencional no

será posible en el análisis del caso de diseño, por lo tanto, se optará por el uso de normativas extranjeras para el diseño.

2.2 Importancia y alcances

La constante degradación de la estructura de una vivienda es un problema de gran relevancia para el sector afectado, ya que no solo amenaza la seguridad y calidad de vida de quienes habitan en la edificación, sino que también conlleva implicaciones económicas y sociales significativas. La seguridad de los residentes se ve comprometida, ya que las estructuras deterioradas pueden dar lugar a accidentes graves o incluso fatales. Por lo tanto, abordar de manera efectiva la problemática del deterioro constante de la estructura de viviendas es fundamental para garantizar la seguridad y el bienestar de la población y para promover un desarrollo urbano sostenible. Todo esto teniendo en cuenta que la vivienda se encuentra ubicada dentro del territorio proclamado como centro histórico.

Por esta razón, se plantea el diseño y modelamiento de una estructura con y sin aislamiento sísmico manteniéndose dentro de los ámbitos y recomendaciones normativas del Ecuador. En el análisis se presentará resultados para lograr delimitar qué estructura resulta más conveniente en cuestión de seguridad mediante una comparativa.

La principal importancia de realizar un cálculo estructural con aislamiento sísmico radica en la seguridad de las personas que ocuparán la edificación. Los sismos pueden representar una amenaza importante para la vida humana. Un cálculo estructural adecuado con aislamiento sísmico puede reducir significativamente el riesgo de colapso de un edificio durante un terremoto, protegiendo así a las personas que trabajan, viven o visitan el edificio.

Un edificio que ha sido diseñado con consideraciones sísmicas adecuadas es menos propenso a sufrir daños estructurales costosos durante un terremoto. Esto puede tener un impacto significativo en la preservación del valor de la propiedad y en la capacidad de seguir utilizando el edificio después de un evento sísmico. Este diseño puede beneficiar a futuros proyectos de construcción al mejorar la eficiencia y la efectividad de las medidas de mitigación sísmica dentro del campo investigativo de la ingeniería civil.

En el territorio ecuatoriano existen regulaciones y normativas estrictas relacionadas con la resistencia sísmica de las edificaciones, lograr que la edificación cumpla con estas normativas es fundamental para garantizar la seguridad pública. Sin embargo, Ecuador no cuenta con un capítulo específico de aislamiento sísmico dentro de la normativa sismorresistente, no obstante, sugiere las linealidades presentadas por una normativa extranjera, la misma que se tomará en cuenta para el diseño estructural.

El enfoque del proyecto estará centrado únicamente en el diseño de la superestructura de la edificación con y sin aislamiento sísmico, el cual no se ampliará hacia el reforzamiento de la estructura ya construida. Es importante destacar que, si bien la cimentación o infraestructura es un componente necesario para la estabilidad sísmica de un edificio, se considera como una parte integral de futuras investigaciones y análisis de casos. Así como también un replanteo futuro de la edificación optimizando la relación seguridad-economía.

2.3 Delimitación

A continuación, se presenta las generalidades del proyecto, planteando un modelo arquitectónico preliminar, el mismo que servirá como apoyo para el modelamiento estructural planteado.

2.3.1 Localización

El proyecto se encuentra ubicado en Ecuador, en la provincia del Azuay, cantón Cuenca, delimitado por las calles Avenida Loja y Calle Manabí. El terreno se encuentra dentro del territorio denominado centro histórico.

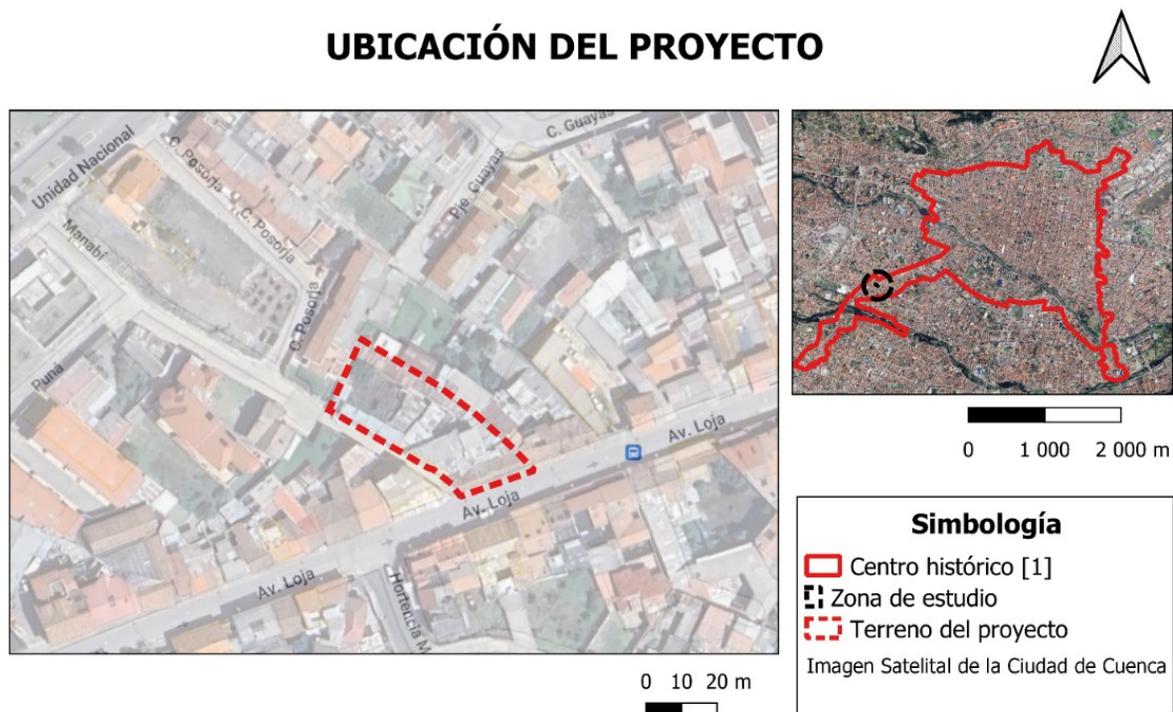


Figura 2: Ubicación del proyecto

2.3.2 Características del terreno

- Propietario/a: Andrade Castro Rosa María
- Predio Urbano: 0804023019000
- Área de terreno 1079.84m²
- Área de construcción actual en el terreno: 693m²
- Frente 64.12m²

2.3.3 Funcionalidad

El edificio está proyectado para viviendas de tipo departamento en sus plantas superiores, un subsuelo destinado para parqueaderos y la planta baja junto con el frente para locales comerciales.

2.3.4 Anteproyecto de la edificación

La edificación se verá planteada con una estructura de hormigón armado, por la cual se regirá a la normativa ecuatoriana presentada para hormigón armado, NEC-SE-HM, y con la Guía Práctica para el Diseño de Estructuras de Hormigón Armado de conformidad con la Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC 2015.



Figura 3: Diseño arquitectónico preliminar

3. Objetivos

3.1 Objetivo General

Realizar el Cálculo Estructural de una edificación ubicada en el centro histórico de la ciudad de Cuenca con una metodología de diseño con énfasis en el uso de aislamiento sísmico, el mismo que servirá como ejemplo de modelo constructivo para futuras edificaciones.

3.2 Objetivos específicos

- Diseñar la superestructura en base a la normativa ecuatoriana y las normativas extranjeras con énfasis en el uso del aislamiento sísmico.
- Comparar el análisis de diseño dinámico de la estructura en términos de riesgo sísmico con y sin aislamiento sísmico.

4. Fundamentos teóricos

El diseño estructural preciso de una edificación requiere la aplicación hábil de los criterios adquiridos durante el recorrido académico, junto con la práctica y la comprensión profunda de los fundamentos teóricos asimilados, tales como los nombrados a continuación:

- Teoría de la elasticidad y resistencia de materiales.
- Principios de análisis estructural, como la teoría de vigas, armaduras, y análisis de tensiones y deformaciones.
- Métodos de cálculo estructural, incluyendo el método de los elementos finitos, métodos analíticos y numéricos.
- Conceptos de carga y comportamiento de materiales bajo diferentes condiciones de carga (estática y dinámica).

- Normativas y códigos de construcción aplicables a la ingeniería estructural.

4.1 Metodología sismorresistente

Para asegurar la vida útil y la resistencia de una estructura ante los sismos, se debe tener en cuenta varios aspectos generales al momento del diseño de una edificación. En primer lugar, se debe conocer si la zona de estudio se encuentra propensa a actividad sísmica y si es el caso, conocer la actividad sísmica previa según los registros que se tenga. Además de eso, se necesita conocer las propiedades geotécnicas del suelo. Este registro permitirá conocer las fuerzas y aceleraciones máximas del suelo, las cuales servirán como punto de partida para el diseño de la edificación, ya que este, debería ser capaz de soportar las cargas mencionadas (NEC Normativa de construcción Sismo Resistente, 2015).

Otro aspecto importante es la selección apropiada del sistema estructural apoyado en una normativa de diseño. Asimismo, se debe tener en cuenta la carga de servicio a la que estará sometida la edificación. La implementación de muros, vigas, losas y columnas generan un peso muerto en la estructura, la cual también debe ser capaz de resistir la edificación (Perles & Lafuente, 2009)

Para la edificación se plantea una estructura convencional aporticada, diseño de cimentaciones, vigas, columnas y losas; sin perder el horizonte del proyecto teniendo en cuenta la aislación sísmica en la base de la estructura; todo este análisis se hará mediante la normativa de diseño sismo resistente del Ecuador NEC-SE-DS.

En este proyecto se desarrollarán y aplicarán estos fundamentos teóricos al estudio, análisis y diseño de la estructura, mostrando su relevancia y aplicabilidad en el campo del cálculo estructural dentro de la Ingeniería Civil.

5. Marco metodológico

5.1 Diseño estructural con y sin aislación sísmica

El cálculo estructural es un proceso complejo que implica varios pasos. En primer lugar, se recopilan datos relevantes sobre la estructura, como las cargas que soportará y las propiedades de los materiales a utilizar. Luego, se realizan análisis matemáticos y computacionales utilizando métodos como el método de los elementos finitos o métodos analíticos para modelar y simular el comportamiento de la estructura bajo diferentes condiciones. Posteriormente, se identifican y evalúan las posibles áreas de debilidad o fallos en el diseño. (Perles & Lafuente, 2009)

Las soluciones pueden implicar ajustes en la geometría estructural, cambios en los materiales utilizados o la incorporación de refuerzos adicionales para garantizar la estabilidad y seguridad de la estructura. Es fundamental realizar verificaciones exhaustivas para asegurar que la estructura cumpla con las normativas y estándares de seguridad establecidos.

Una solución planteada para el control de daño de una estructura es la implementación de la aislación sísmica. Este se centra en la reducción de los efectos destructivos de los terremotos al introducir dispositivos y sistemas que permiten que la estructura se mueva de manera controlada durante un evento sísmico. Entre estos dispositivos se encuentran los aisladores sísmicos, que se colocan estratégicamente entre la base de la estructura y el suelo o entre los diferentes entrepisos de la estructura.

Estos aisladores actúan como amortiguadores, permitiendo la absorción y disipación de la energía liberada durante un terremoto, minimizando así las fuerzas transmitidas a la estructura. La aislación sísmica no solo protege la integridad de la construcción, sino que

también contribuye a preservar la seguridad de los ocupantes y a reducir los costos de reparación y reconstrucción después de un evento sísmico significativo. Este enfoque innovador ha demostrado ser efectivo en el diseño de estructuras sismorresistentes, marcando un avance crucial en la mitigación de riesgos y la preservación de la infraestructura ante eventos telúricos. (Genatios & Lafuente, 2016)

5.2 Consideraciones para el cálculo estructural

Antes de llevar a cabo el cálculo estructural, es esencial considerar una serie de criterios fundamentales que influirán en la precisión y eficacia del diseño. En primer lugar, se deben recopilar datos precisos sobre la carga que soportará la estructura, incluyendo tanto las cargas permanentes (como el peso propio de la estructura) como las cargas variables (tales como la ocupación, el mobiliario, el viento, entre otros).

Asimismo, es crucial conocer las propiedades mecánicas de los materiales a emplear, incluyendo su resistencia, elasticidad y otros factores relevantes para seleccionar los materiales más apropiados.

Además de comprender el comportamiento estructural bajo distintas condiciones de carga y evaluar las normativas y códigos de construcción pertinentes son consideraciones vitales. La comprensión de estos criterios permite establecer las bases sólidas necesarias para llevar a cabo un diseño estructural riguroso y seguro. (Andrade, 2009)

5.2.1 Códigos de diseño y normativas de construcción

Un diseño estructural siempre deberá estar regido en base a los lineamientos mínimos y/o máximos que dispone la normativa local por varias razones fundamentales. Una normativa

proporciona un conjunto de estándares y directrices técnicas que establecen los requisitos mínimos para el diseño, la construcción y la seguridad de las edificaciones. (Andrade, 2009)

Estas normativas son elaboradas por organismos gubernamentales, instituciones de ingeniería, o entidades especializadas, y están destinadas a garantizar la integridad estructural, la seguridad de las personas y la durabilidad de las construcciones. Esta debe regirse por principios técnicos y científicos, basándose en investigaciones, pruebas y conocimientos actualizados en el campo de la ingeniería estructural y la arquitectura. Además, debe tener en cuenta factores como las condiciones geográficas, climáticas y sísmicas de la región en la que se aplicará.

Algunas de las razones clave para usar una normativa de construcción incluyen:

- **Seguridad Pública:** Las normativas se centran en salvaguardar la vida y la seguridad de las personas que ocuparán o interactuarán con las edificaciones. Establecen estándares para prevenir riesgos y minimizar la posibilidad de colapsos o daños graves.
- **Calidad de la construcción:** Proporcionan pautas para la selección de materiales, métodos de construcción y prácticas que garanticen la calidad y durabilidad de las estructuras a lo largo del tiempo.
- **Cumplimiento Legal:** El uso de una normativa de construcción es obligatorio y está respaldado por leyes y regulaciones locales. El cumplimiento con estas normas es esencial para obtener permisos de construcción y garantizar la legalidad de las edificaciones.

A continuación, se especifican las normas obligatorias y los códigos de diseño que son aplicados en el territorio ecuatoriano.

Norma Ecuatoriana de la Construcción, NEC-2015, tres capítulos:

- NEC_SE_CG (Cargas no sísmicas)
- NEC_SE_DS (Peligro sísmico)
- NEC_SE_HM (Hormigón armado)

Adicional a esto, cumplir con recomendaciones extranjeras en el ámbito de la construcción es crucial por diversas razones. En primer lugar, estas recomendaciones a menudo se basan en estándares internacionales respaldados por investigaciones exhaustivas, experiencias prácticas y avances tecnológicos que trascienden las fronteras nacionales.

Al adoptar estas pautas, se promueve la aplicación de las mejores prácticas reconocidas a nivel global, contribuyendo a la mejora de la calidad, seguridad y sostenibilidad de las construcciones. Además, la adopción de recomendaciones extranjeras puede ser esencial en proyectos internacionales, facilitando la interoperabilidad y el entendimiento entre profesionales de diferentes regiones. (NEC Normativa de construcción Sismo Resistente, 2015)

Dentro de la Normativa Ecuatoriana de la Construcción tanto en el ámbito de estructuras convencionales de hormigón armado, como en el apartado de aislación sísmica se recomienda el uso de diferentes normativas extranjeras. De las que se pueden mencionar:

- American Concrete Institute – 2019 (ACI 318-19)
- Minumun Desing Loads for Buildings and other Structures (Standard ASCE/SEI-7-10)

- Building Seismic Safety Council BSSC (2004), "NEHRP"
- FEMA 440 Improvement of nonlinear static seismic analysis procedures

5.2.2 Criterios generales para el diseño estructural

5.2.2.1 Planos arquitectónicos preliminares

Es fundamental, previo al análisis estructural, conocer la distribución de y la funcionalidad a la cual se verá planteada una edificación. Un plano arquitectónico preliminar, permite de manera visual conceptualizar una posible solución estructural a la edificación.

5.2.2.2 Estructuración y definición de ejes

La organización y la correcta distribución de los elementos de una edificación proporcionan la base para un análisis preciso y eficiente de las cargas y las fuerzas que actuarán sobre la estructura. La estructuración implica organizar los elementos de la edificación, como columnas, vigas y losas, de manera lógica y funcional para lograr optimizar la resistencia y la estabilidad de una estructura.

La definición de ejes, por otro lado, implica la identificación de líneas de referencia a lo largo de la estructura. Estos ejes suelen estar asociados con los elementos estructurales principales y son esenciales para establecer sistemas de coordenadas que simplifiquen los cálculos y el análisis de fuerzas. Además, los ejes son cruciales para determinar la ubicación y orientación de las cargas aplicadas, así como para la distribución de momentos y cortantes en la estructura.

Este apartado es fundamental para la modelación matemática de la estructura y la aplicación de principios de la mecánica de materiales. Al establecer una estructura bien definida con ejes claramente identificados, se puede realizar cálculos precisos y analizar el

comportamiento de la estructura frente a diversas condiciones de carga, incluyendo cargas gravitacionales, sísmicas y de viento.

5.2.2.3 Interacción suelo-estructura

Una relación suelo-estructura bien considerada permite adaptar el diseño estructural a las condiciones geotécnicas específicas, asegurando la distribución adecuada de cargas y evitando problemas como asentamientos diferenciales o deslizamientos, esencial para garantizar la seguridad y durabilidad de las construcciones, particularmente en áreas propensas a movimientos sísmicos o variaciones en las condiciones del suelo. (Mesenguer, 2011)

Para el modelamiento matemático se debería considerar la superestructura como un elemento de empotramiento en su base, simulando la conexión suelo-estructura.

5.2.3 Definición de materiales

La definición de materiales para una construcción es un proceso integral que implica la selección meticulosa y la especificación detallada de los materiales que se utilizarán en el proyecto, considerando diversos factores como las cargas estructurales, las condiciones ambientales, la durabilidad y la sostenibilidad. (Borja Varona et al., 2013)

La elección de materiales como el concreto, el acero o la madera se basa en sus propiedades mecánicas y comportamiento bajo cargas de diseño. Esta definición también abarca la especificación de grados, resistencias y características adicionales necesarias para cumplir con los estándares de seguridad y rendimiento establecidos por las normativas locales y códigos de construcción. La selección de materiales apropiados es esencial para el rendimiento, la vida útil y la capacidad de la construcción para resistir condiciones adversas y minimizar el impacto ambiental, contribuyendo al éxito global del proyecto. (Borja Varona et al., 2013)

En el presente proyecto se trabajará con la combinación de dos materiales. El hormigón en conjunto con el acero, conformando el elemento de Hormigón Armado. Conceptos importantes que se tienen en cuenta son:

- Módulo de elasticidad
- Peso volumétrico
- Coeficiente de Poisson
- Módulo de corte
- Resistencia a la compresión (hormigón)
- Resistencia a la flexión (acero)
- Esfuerzo de fluencia (acero)

5.2.4 Casos de carga

Entre estas cargas se incluyen el peso propio de los elementos estructurales, como vigas, columnas y losas, así como el peso de elementos no estructurales como paredes, acabados y equipos. Además, se evalúan las cargas derivadas de la utilización prevista del edificio, como mobiliario, ocupantes y cualquier equipo adicional. La sobrecarga en losas y vigas también se tiene en cuenta, considerando la posible concentración de cargas en áreas específicas. En el caso de edificaciones con múltiples niveles, se evalúa la carga vertical transmitida por los elementos estructurales superiores.

Estos diversos casos de cargas gravitacionales son esenciales para determinar las fuerzas y momentos que actúan sobre la estructura, permitiendo tener un dimensionamiento y diseño correcto de los elementos garantizando así la seguridad de la estructura durante su vida útil. (Andrade, 2009)

En Ecuador se tienen recomendaciones de uso de cargas en el capítulo de la normativa NEC Cargas no sísmicas sobre la sobrecarga de una estructura en función a los materiales de construcción y en función de la ocupación prevista para la estructura.

5.2.5 Combinaciones de carga

Para obtener un diseño por última resistencia es necesario analizar el estado límite de resistencia y conceptualizar el caso de carga más desfavorable para la estructura. Una combinación de carga exige a la estructura un incremento de fuerzas capaces de mitigar con el fin de funcionar como factor de seguridad estructural.

En el capítulo de la NEC Cargas (no sísmicas) en el apartado 3.4.3. enumera los casos de combinaciones de carga en donde se deberá regir al más desfavorable para la estructura.

Combinación 1: $1.4 D$

Combinación 2: $1.2 D + 1.6 L + 0.5 \max[Lr; S; R]$

Combinación 3: $1.2 D + 1.6 \max[Lr; S; R] + \max[L; 0.5W]$

Combinación 4: $1.2 D + 1.0 W + L + 0.5 \max[Lr; S; R]$

Combinación 5: $1.2 D + 1.0 E + L + 0.2 S$

Combinación 6: $0.9 D + 1.0 W$

Combinación 7: $0.9 D + 1.0 E$

***D** Carga permanente*

***E** Carga de sismo*

***L** Sobrecarga (carga viva)*

***Lr** Sobrecarga cubierta (carga viva)*

***S** Carga de granizo*

***W** Carga de viento*

***R** Carga de lluvia*

5.2.6 Predimensionamiento de elementos estructurales

El cálculo estructural es un proceso iterativo lo que conlleva a la optimización de la estructura manteniéndose dentro del factor de seguridad impuesto sin llegar al fallo de los elementos. Para el inicio del método de cálculo se debe tener en cuenta recomendaciones de las normativas para iniciar con un predimensionamiento óptimo y lo más cercano a las dimensiones finales.

5.2.6.1 Vigas

Para la estimación de las dimensiones de una viga se tienen en cuenta las recomendaciones dispuestas por la normativa ACI 318-19. Es importante destacar que un predimensionamiento no sustituye un diseño estructural completo y detallado. Generalmente se hace la referencia a la viga de mayor luz, ya que esta será la que proporcione el momento más elevado. También a la cuantía mínima ($\rho_{min} = \frac{14}{F_y}$) y máxima ($\rho_{max} = 0.75\rho_b$) para el acero de refuerzo.

$$h = \frac{L}{10} \qquad b = \frac{h}{2}$$

***h** Altura de la viga (cm)*

***b** Base de la viga (cm)*

***L** Luz libre de la viga*

***ρ_{min}** Cuantía mínima*

***ρ_{max}** Cuantía máxima*

***F_y** Esfuerzo de fluencia del acero*

***ρ_b** Cuantía balanceada*

5.2.6.2 Columnas

El predimensionamiento de una columna es una fase crucial en el diseño estructural, permitiendo estimar sus dimensiones iniciales antes de un análisis estructural detallado. La normativa ACI 318-19 recomienda el uso de una fórmula para el predimensionamiento de columnas, así como también el refuerzo del acero que va desde la cuantía mínima a la máxima.

$$A_g = \frac{P_u}{0.35 * f'_c} \qquad 1\% < \rho = \frac{A_g}{A_s} < 3\%$$

***A_g** Área global de la sección (cm²)*

***P_u** Carga axial mayorada (kg)*

***A_s** Área total del acero de refuerzo (cm²)*

***f'_c** Resistencia a la compresión del concreto (kg/cm²)*

Estas fórmulas proporcionan el área de la sección transversal requerida y la cantidad de acero para resistir la carga axial aplicada a la columna. Este enfoque simplificado debe utilizarse con criterio y no reemplaza un diseño estructural completo y detallado. Factores adicionales, como la longitud efectiva de la columna, las condiciones de apoyo y los requisitos del código de construcción, deben ser considerados en el análisis estructural completo.

5.2.6.3 Losas

El predimensionamiento de losas es un paso inicial en el diseño estructural que permite estimar sus dimensiones antes de un análisis estructural más detallado. Para el predimensionamiento de una losa, se lleva a cabo las recomendaciones dispuestas por la normativa ACI 318-19 en la sección 8.3.1.1.

Tabla 8.3.1.1 — Espesor mínimo de losas no preesforzadas en dos direcciones sin vigas interiores (mm) ^[1]

f_y MPa ^[2]	Sin ábacos ^[3]			Con ábacos ^[3]		
	Paneles exteriores		Paneles interiores	Paneles exteriores		Paneles interiores
	Sin vigas de borde	Con vigas de borde ^[4]		Sin vigas de borde	Con vigas de borde ^[4]	
280	$\frac{\ell_n}{33}$	$\frac{\ell_n}{36}$	$\frac{\ell_n}{36}$	$\frac{\ell_n}{36}$	$\frac{\ell_n}{40}$	$\frac{\ell_n}{40}$
420	$\frac{\ell_n}{30}$	$\frac{\ell_n}{33}$	$\frac{\ell_n}{33}$	$\frac{\ell_n}{33}$	$\frac{\ell_n}{36}$	$\frac{\ell_n}{36}$
520	$\frac{\ell_n}{28}$	$\frac{\ell_n}{31}$	$\frac{\ell_n}{31}$	$\frac{\ell_n}{31}$	$\frac{\ell_n}{34}$	$\frac{\ell_n}{34}$

^[1] ℓ_n es la luz libre en la dirección larga, medida entre caras de los apoyos (mm).

^[2] Para f_y entre los valores dados en la tabla, el espesor mínimo debe obtenerse por interpolación lineal.

Tabla 1: Predimensionamiento de losas

American Concrete Institute 2019

5.2.7 Diseño sismorresistente

Un diseño sismorresistente hace énfasis en la aplicación de estrategias y técnicas estructurales para mitigar los efectos de los terremotos. Esto incluye análisis sísmicos previos, la implementación de sistemas estructurales específicos, el uso de disipadores de energía, detallado y refuerzo adecuado, cimentaciones diseñadas para resistir fuerzas sísmicas, y el cumplimiento de normativas locales. La planificación sísmica, educación pública y el respeto a los códigos de construcción son fundamentales en este enfoque, buscando garantizar la seguridad de las personas y la integridad de las edificaciones durante eventos sísmicos. (Jiménez-Pacheco et al., 2018)

5.2.8 Consideraciones generales

Según el instituto “Red Sísmica del Austro” cataloga el suelo del Centro Histórico de Cuenca de tipo “C”, el cual será de uso para este estudio, sin embargo, sería necesario realizar

un estudio de suelos para catalogar el tipo de suelo, mejorando la exactitud del diseño estructural.

5.2.8.1 Período fundamental de la estructura

El periodo de una estructura es una medida que describe el tiempo que tarda dicha estructura en completar un ciclo completo de vibración después de ser perturbada por una fuerza externa o un evento sísmico. En el contexto sísmico, el periodo es una propiedad dinámica crucial que influye en la respuesta sísmica de la estructura. Es una característica intrínseca de la dinámica de la estructura y está relacionada con factores como la masa, la rigidez y la distribución de la masa en la estructura. (NEC Normativa de Construcción Sismorresistente)

La normativa NEC-SE-DS propone dos métodos para la estimación del periodo de una estructura en el apartado 6.3.3.

- **Método 1**

$$T = C_t h_n^\alpha$$

T Periodo de vibración (seg)

C_t Coeficiente que depende del tipo de edificio

h_n Altura máxima de la edificación de *n* pisos, desde la base de la estructura (m)

Tipo de estructura	<i>C_t</i>	<i>α</i>
Estructuras de acero		
Sin arriostramientos	0.072	0.8
Con arriostramientos	0.073	0.75
Pórticos especiales de hormigón armado		
Sin muros estructurales ni diagonales rigidizadoras	0.055	0.9
Con muros estructurales o diagonales rigidizadoras y para otras estructuras basadas en muros estructurales y mampostería estructural	0.055	0.75

Tabla 2: Coeficientes para la estimación del período *T*

NEC Peligro Sísmico

- **Método 2**

El cálculo del período fundamental T se puede llevar a cabo utilizando las propiedades estructurales y las características de deformación de los elementos resistentes, mediante un análisis apropiado y debidamente respaldado. Este requisito puede ser satisfecho aplicando la siguiente expresión en cada dirección principal de la estructura o a través de un análisis modal.

$$T_a = 2\pi \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n w_i \delta_i^2}{g \sum_{i=1}^n f_i \delta_i}}$$

f_i Representa cualquier distribución aproximada de las fuerzas laterales en el piso i , de acuerdo con los principios descritos en el presente capítulo, o cualquiera otra distribución racional.

δ_i Deflexión elástica del piso i , calculada utilizando las fuerzas laterales f_i

W_i Peso aginado al piso o nivel i de la estructura, siendo una fracción de la carga reactiva W (incluye la fracción de la carga viva correspondiente) peso: w / cargas: W

Nota importante: Dentro de las exigencias del cumplimiento de la normativa el cálculo del valor de T_a mediante el Método 2 no debe exceder en un 30% al valor obtenido con el Método 1 y que se debe iterar hasta que la variación del período no sobrepase el 10% entre ambos métodos.

5.2.8.2 Cargas sísmicas

La importancia de las cargas sísmicas en el diseño estructural radica en su papel crucial para prever y mitigar los efectos devastadores de los terremotos en las edificaciones. Estas cargas representan las fuerzas generadas por la actividad sísmica y pueden ejercer fuerzas considerables sobre las estructuras. Un diseño que incorpora adecuadamente las cargas sísmicas garantiza la resistencia y estabilidad de la edificación durante eventos sísmicos, protegiendo la vida de las personas y reduciendo los daños materiales. (Darwin, 2001)

Para el análisis de las cargas sísmicas de diseño se hará hincapié en la normativa de diseño sismorresistente del Ecuador NEC-SE-DS.

5.2.8.2.1 Cortante Basal de diseño

Según la normativa NEC-SE-DS El cortante basal total de diseño V , a nivel de cargas últimas, aplicado a una estructura en una dirección especificada, se determinará mediante las expresiones:

$$V = \frac{IS_a(T_a)}{R\phi_p\phi_E}W$$

$S_a(T_a)$ Espectro de diseño en aceleración; véase en la sección [3.3.2]

ϕ_P y ϕ_E Coeficientes de configuración en planta y elevación; véase en la sección [5.3]

I Coeficiente de importancia; se determina en la sección [4.1]

R Factor de reducción de resistencia sísmica; véase en la sección [6.3.4]

V Cortante basal total de diseño

W Carga sísmica reactiva; véase en la sección [6.1.7]

T_a Período de vibración; véase en la sección [6.3.3]

5.2.8.2.2 Espectro elástico de diseño

El espectro de respuesta elástica de aceleraciones (S_a), representado como una fracción de la aceleración debida a la gravedad, para el nivel de sismo de diseño, el cual se ajusta en concordancia con varios factores, que incluyen el factor de zona sísmica (Z), el tipo de suelo

presente en el emplazamiento de la estructura y la consideración de los coeficientes de amplificación de suelo (F_a , F_d , F_s).

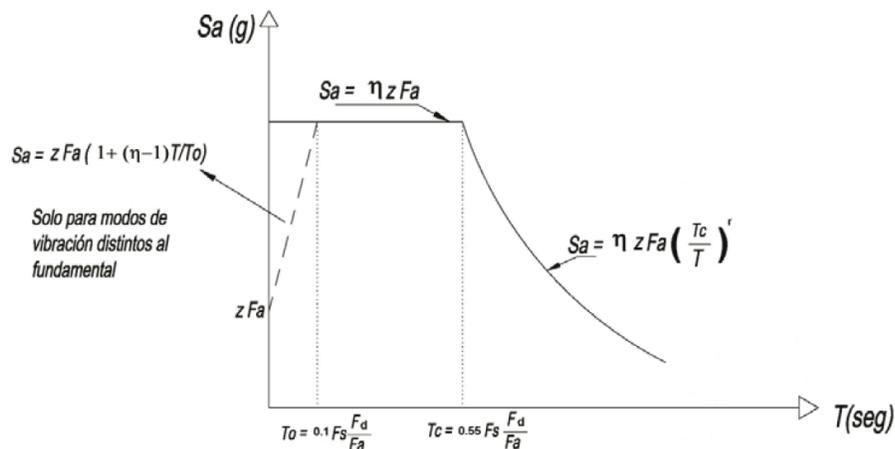


Figura 4: Espectro inelástico horizontal de diseño en aceleraciones

Fuente: NEC Peligro Sísmico

- η Razón entre la aceleración espectral S_a ($T = 0.1$ s) y el PGA para el período de retorno seleccionado.

η 1.80 provincias de la sierra

- Z Aceleración máxima en roca esperada para el sismo de diseño, expresada como fracción de la aceleración de la gravedad g .

Zona sísmica	I	II	III	IV	V	VI
Valor factor Z	0.15	0.25	0.30	0.35	0.40	≥ 0.50
Caracterización del peligro sísmico	Intermedia	Alta	Alta	Alta	Alta	Muy alta

Tabla 3: Valores del factor Z en función de la zona sísmica adoptada

NEC Peligro Sísmico

- F_a Coeficiente de amplificación de suelo en la zona de período cortó. Amplifica las ordenadas del espectro elástico de respuesta de aceleraciones para diseño en roca, considerando los efectos de sitio.

Tipo de perfil del subsuelo	Zona sísmica y factor Z					
	I	II	III	IV	V	VI
	0.15	0.25	0.30	0.35	0.40	≥ 0.5
A	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
B	1	1	1	1	1	1
C	1.4	1.3	1.25	1.23	1.2	1.18
D	1.6	1.4	1.3	1.25	1.2	1.12
E	1.8	1.4	1.25	1.1	1.0	0.85
F	Véase Tabla 2 : Clasificación de los perfiles de suelo y la sección 10.5.4					

Tabla 4: Tipo de suelo y Factores de sitio F_a

NEC Peligro Sísmico

- **F_s** Coeficiente de amplificación de suelo. Considera el comportamiento no lineal de los suelos, la degradación del período del sitio que depende de la intensidad y contenido de frecuencia de la excitación sísmica y los desplazamientos relativos del suelo, para los espectros de aceleraciones y desplazamientos

Tipo de perfil del subsuelo	Zona sísmica y factor Z					
	I	II	III	IV	V	VI
	0.15	0.25	0.30	0.35	0.40	≥ 0.5
A	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
B	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
C	0.85	0.94	1.02	1.06	1.11	1.23
D	1.02	1.06	1.11	1.19	1.28	1.40
E	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2
F	Véase Tabla 2 : Clasificación de los perfiles de suelo y 10.6.4					

Tabla 5: Tipo de suelo y Factores del comportamiento inelástico del subsuelo F_s

NEC Peligro Sísmico

- **F_d** coeficiente que amplifica las ordenadas del espectro elástico de respuesta de desplazamientos para diseño en roca, considerando los efectos de sitio.

Tipo de perfil del subsuelo	Zona sísmica y factor Z					
	I	II	III	IV	V	VI
	0.15	0.25	0.30	0.35	0.40	≥ 0.5
A	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
B	1	1	1	1	1	1
C	1.36	1.28	1.19	1.15	1.11	1.06
D	1.62	1.45	1.36	1.28	1.19	1.11
E	2.1	1.75	1.7	1.65	1.6	1.5
F	Véase Tabla 2 : Clasificación de los perfiles de suelo y 10.6.4					

Tabla 6: Tipo de suelo y Factores de sitio F_d

NEC Peligro Sísmico

- **S_a** Espectro de respuesta elástico de aceleraciones (expresado como fracción de la aceleración de la gravedad g).
- **T** Período fundamental de vibración de la estructura.
- **T_o** Período límite de vibración en el espectro sísmico elástico de aceleraciones que representa el sismo de diseño.
- **T_c** Período límite de vibración en el espectro sísmico elástico de aceleraciones que representa el sismo de diseño.

5.2.8.3 Análisis modal y modos de vibración

Un análisis modal proporciona información detallada sobre el comportamiento vibratorio de una estructura al identificar sus modos de vibración naturales y las respuestas asociadas. Esto es esencial para evaluar la respuesta dinámica y diseñar estructuras capaces de resistir cargas dinámicas, como las generadas por sismos.

En un análisis modal se configura la estructura como un conjunto de masas concentradas conectadas por resortes y amortiguadores, y se resuelve el sistema de ecuaciones diferenciales

que describe el movimiento vibratorio. Los modos de vibración resultantes representan las formas características de movimiento de la estructura.

La normativa NEC-SE-DS establece considerar los siguientes análisis:

- Todos los modos de vibración que contribuyan significativamente a la respuesta total de la estructura, mediante los varios períodos de vibración.
- Todos los modos que involucren la participación de una masa modal acumulada de al menos el 90% de la masa total.
- Los dos primeros modos de vibración deberán ser traslacionales o longitudinales según corresponda, a partir del tercer modo debe cumplir con el modo rotacional.

5.2.9 Criterios de diseño

El criterio general en el que se rige el diseño de los elementos es la disipación de las fuerzas sísmicas y gravitatorias. Las mismas son las causantes de la aparición de esfuerzos dentro de los elementos de las estructuras, por lo cual, el diseño deberá soportar dichas cargas y esfuerzos.

5.2.9.1 Fuerzas Axiales

Las fuerzas axiales son fuerzas que actúan a lo largo del eje longitudinal de un elemento estructural, es decir, a lo largo de su eje principal. Estas fuerzas pueden ser tanto de compresión como de tracción, dependiendo de si actúan hacia adentro (compresión) o hacia afuera (tracción) a lo largo del eje del elemento.

Cuando una fuerza axial actúa sobre un elemento estructural, como una viga, columna o miembro de un marco, crea esfuerzos internos que causan deformaciones en el material. En el

caso de la compresión, el material tiende a comprimirse, mientras que, en la tracción o tensión, tiende a estirarse. (Darwin, 2001)

5.2.9.2 Fuerzas Cortantes

La fuerza cortante, en el contexto de la ingeniería estructural, es una fuerza que actúa perpendicularmente a la longitud de un elemento estructural, como una viga. También conocida como fuerza de corte o cortante, esta fuerza provoca esfuerzos internos en el material que pueden resultar en el desplazamiento relativo de las secciones adyacentes del elemento.

La fuerza cortante es esencial en el análisis y diseño de estructuras, ya que puede afectar la integridad y estabilidad de los elementos estructurales, especialmente en situaciones como cargas concentradas, distribuidas o cambios bruscos en la geometría. Su comprensión y consideración son cruciales para garantizar la resistencia y seguridad de las construcciones. (Darwin, 2001)

5.2.9.3 Flexión y torsión

La flexión se refiere a la deformación de un elemento estructural cuando se aplica una carga que tiende a curvarlo. En una viga, por ejemplo, cuando se aplica una carga en dirección perpendicular a su longitud, se generan esfuerzos de flexión. Esto resulta en una curvatura del elemento, con una región en compresión en la parte superior y otra en tracción en la parte inferior. La flexión y la torsión son dos tipos de esfuerzos que producen deformaciones que pueden incidir en elementos estructurales, especialmente en vigas y columnas.

La torsión implica una deformación causada por la aplicación de una carga que tiende a hacer girar un elemento alrededor de su eje longitudinal. Este tipo de esfuerzo se produce

comúnmente en elementos cilíndricos, como ejes o columnas. La torsión induce esfuerzos de corte en el material, causando un giro alrededor de su eje central. (Darwin, 2001)

5.2.10 Replanteo de elementos estructurales

El replanteo de elementos estructurales es un proceso crítico que implica la reconsideración y ajuste de componentes de una estructura para mejorar su desempeño, cumplir con nuevos requisitos o corregir deficiencias. Al emprender este proceso, varios parámetros esenciales se tienen en cuenta para garantizar un diseño estructural efectivo y seguro. Los objetivos del rediseño, implica mejorar la capacidad de carga, incorporar nuevas funciones o corregir problemas específicos identificados en el predimensionamiento.

5.2.11 Comprobaciones

5.2.11.1 Cumplimiento de las solicitaciones de carga

El cumplimiento de solicitaciones de carga implica realizar análisis estructurales detallados, considerar normativas y códigos de construcción aplicables, y asegurar que la estructura sea diseñada para resistir todas las condiciones a las que estará expuesta durante su vida útil.

5.2.11.2 Normativas y Códigos Actuales

Se revisan y aplican las normativas y códigos de construcción vigentes, ya que estos pueden haberse actualizado desde la construcción original y establecen los estándares de seguridad y diseño.

5.2.11.3 Materiales y Resistencia

Se evalúan las propiedades de los materiales utilizados en la estructura, como el concreto, acero u otros, para asegurar que cumplan con los requisitos de resistencia y durabilidad. (Andrade, 2009)

5.2.11.4 Deformaciones y Deflexiones

Se analizan las deformaciones, deflexiones permitidas como las derivas de piso para asegurar que la estructura no supere los límites establecidos por normativas y códigos, evitando así problemas como agrietamientos o colapsos. (Mesenguer, 2011)

5.2.11.5 Actualización de Modelos Estructurales

Se actualizan los modelos de análisis estructural utilizando herramientas de ingeniería estructural avanzadas para reflejar con precisión las condiciones actuales y prever el comportamiento futuro.

5.2.11.6 Consideraciones económicas

Se tienen en cuenta aspectos económicos, evaluando la viabilidad y el costo del rediseño en comparación con la construcción de una nueva estructura.

5.3 Aislación sísmica

La aislación sísmica es una estrategia de diseño utilizada en ingeniería estructural para mitigar los efectos de los terremotos en edificaciones y estructuras. Consiste en la introducción de dispositivos o técnicas que permiten que la estructura se desplace de manera independiente al suelo durante un evento sísmico, reduciendo así las fuerzas sísmicas transmitidas a la estructura. (Consulting, 2022)

El principal objetivo de la aislación sísmica es mejorar la capacidad de una estructura para resistir terremotos, protegiendo la vida humana y reduciendo los daños materiales. Este enfoque permite que la estructura se comporte de manera más flexible y adaptable durante un sismo, disminuyendo las tensiones y esfuerzos en los elementos estructurales. (Consulting, 2022)

5.3.1 Normativas de diseño para aislación sísmica

Si bien es cierto, en el Ecuador no se tiene una normativa específica para el uso de la aislación sísmica, sin embargo, la normativa NEC-SE-DS en el capítulo 8 “Sistemas de control y aislamiento base”, recomienda el uso y cumplimiento de los capítulos 13 y 15 del BSSC (2004) “NEHRP Recommended Provisions and Commentary for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures" (FEMA 450).

5.3.2 Teoría de la aislación sísmica

Los sistemas de aislación sísmica pueden incluir elementos como aisladores sísmicos, rodamientos base, o dispositivos que permiten el deslizamiento controlado entre elementos estructurales. Estos elementos se colocan estratégicamente en la estructura para absorber y disipar la energía generada por el movimiento sísmico, minimizando la transferencia de fuerzas y deformaciones a la superestructura. (Genatios & Lafuente, 2016).

5.3.2.1 Tipos de aisladores sísmicos y porcentaje de amortiguamiento

Los aisladores sísmicos son dispositivos utilizados en ingeniería estructural para reducir las fuerzas y las vibraciones transmitidas a una estructura durante un terremoto. Existen varios tipos de aisladores sísmicos, cada uno diseñado para proporcionar distintos niveles de

flexibilidad y capacidad de disipación de energía. (Consulting, 2022). Algunos de los tipos más comunes incluyen:

- **LDR:** Se le conoce como amortiguador de bajo amortiguamiento. Consiste en un aislador elastomérico de caucho natural. Su porcentaje de amortiguamiento es de 2% a 3% a la estructura.
- **LRB:** Conocido como aislador de amortiguamiento medio. Este es un aislador elastomérico de láminas de caucho natural y láminas de acero con un núcleo de plomo central. Aporta un amortiguamiento del 15% al 35% a la estructura.
- **HDR:** Aislador de alto amortiguamiento. Es un mejoramiento de un aislador de tipo LDR con aditivos para mejor desempeño del material. Se usa en sitios que son expuestos a climas no muy favorables para el material. Aporta un amortiguamiento del 10% al 20% a la estructura.

5.3.2.2 Amortiguamiento y control de daño

El amortiguamiento y el control de daño son aspectos cruciales en el diseño y la implementación de aisladores sísmicos, contribuyendo significativamente a mejorar la capacidad de una estructura para resistir terremotos.

La combinación efectiva de amortiguamiento y control de daño en los aisladores sísmicos ofrece una estrategia integral para fortalecer las estructuras ante eventos sísmicos. Esto es especialmente importante en áreas propensas a terremotos, donde estas tecnologías avanzadas ayudan a garantizar la seguridad de las personas y la durabilidad de las construcciones, minimizando los impactos negativos de los movimientos sísmicos. (Consulting, 2022)

5.3.2.2.1 Amortiguamiento

- **Reducción de Energía:** El amortiguamiento en los aisladores sísmicos ayuda a disipar la energía generada por las fuerzas sísmicas, evitando la transmisión excesiva de estas fuerzas a la estructura.
- **Minimización de Deformaciones:** Un adecuado amortiguamiento ayuda a controlar las deformaciones de la estructura, reduciendo la posibilidad de daños estructurales y mejorando la seguridad global de la edificación.
- **Mejora de la Resiliencia:** Al disminuir las fuerzas transmitidas a la estructura, se mejora la capacidad de recuperación de esta después de un terremoto, reduciendo el tiempo y los costos asociados con reparaciones y reconstrucciones.

5.3.2.2.2 Control de daño

- **Preservación de la Integridad Estructural:** Los sistemas de aislamiento sísmico con control de daño están diseñados para absorber y distribuir de manera controlada las deformaciones, protegiendo así la integridad estructural y evitando daños severos.
- **Prolongación de la Vida Útil:** Al limitar los daños, se prolonga la vida útil de la estructura, lo que es esencial para la sostenibilidad a largo plazo y la eficiencia económica de la construcción.
- **Reducción de Costos de Mantenimiento:** Minimizar los daños estructurales durante eventos sísmicos resulta en menores costos de mantenimiento y reparación a lo largo del tiempo.

5.3.2.3 Desplazamientos

Los aisladores sísmicos están diseñados para reducir derivas entrepisos y fuerzas transmitidas a las estructuras durante un evento sísmico. Sin embargo, es importante comprender que, aunque estos dispositivos pueden significativamente reducir los desplazamientos en comparación con estructuras convencionales, no eliminan por completo los movimientos sísmicos.

Los desplazamientos máximos permitidos con aisladores sísmicos dependen de varios factores, incluyendo el tipo específico de aislador utilizado, las características sísmicas del sitio y los requisitos de diseño del proyecto. Sin embargo, estos desplazamientos máximos serán distintos para cada tipo de estructura, dependiendo de su nivel de complejidad y sus sollicitaciones de carga. (Consulting, 2022)

5.3.2.4 Diagrama de histéresis

Un diagrama de histéresis, en el contexto de ingeniería sísmica y análisis de estructuras, representa la relación entre la fuerza y el desplazamiento (o deformación) de un sistema estructural durante un ciclo de carga y descarga. Este diagrama proporciona información valiosa sobre el comportamiento no lineal y la capacidad de disipación de energía de una estructura ante cargas cíclicas, como las generadas por un terremoto.

El diagrama de histéresis se obtiene al realizar pruebas experimentales o análisis numéricos que registran la respuesta de una estructura a las fuerzas sísmicas a lo largo del tiempo. (Consulting, 2022). Sus características incluyen:

- Ciclos de carga y descarga: Muestra cómo la estructura responde a las cargas ascendentes y descendentes. Cada ciclo representa un evento sísmico.
- Área encerrada: El área encerrada dentro del ciclo de histéresis proporciona una medida de la energía disipada por la estructura durante el evento sísmico. Un área mayor indica una mayor capacidad de disipación de energía.
- Desplazamiento y Fuerza máximos: Indica los desplazamientos y fuerzas máximas alcanzados por la estructura durante el evento sísmico.

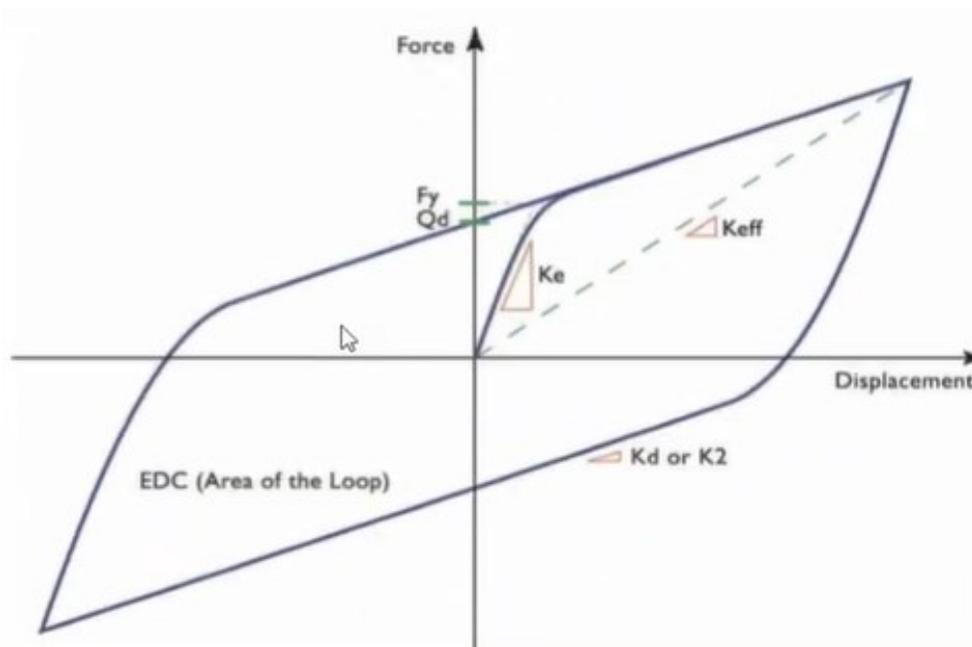


Figura 5: Diagrama de histéresis

5.3.2.5 Costo preliminar

El costo del uso de un sistema del aislamiento sísmico puede repercutir entre 1% y el 3% del costo total de la edificación. Hay que tener en cuenta que, al ser una medida de disipación de energía, se puede replantear el edificio convencional planteando modificaciones en las

secciones preliminares, ya que estas no se encontrarán sometidas las fuerzas sísmicas iniciales. (Genatios & Lafuente, 2016)

5.3.3 Recomendaciones para el uso de aislación sísmica

Para una correcta selección de disipación de energía mediante aislación sísmica se debe llevar a cabo ciertas recomendaciones que influirán en el diseño óptimo del mismo.

5.3.3.1 Tipo de suelo

El tipo de suelo es muy importante para el diseño de una estructura, ya sea convencional o ya sea con aislación sísmica, ya que, al transmitirse las fuerzas de la estructura al suelo se generan esfuerzos que se deben mitigar con un correcto diseño de la cimentación, evitando así problemas futuros como asentamientos diferenciales, deslizamiento o volcamiento.

Para el diseño de una estructura las mejores condiciones siempre será el suelo rocoso, y eso no cambia si se usa aisladores sísmicos en la base, de hecho, un buen suelo es necesario para el uso de aisladores. (Genatios & Lafuente, 2016)

5.3.3.2 Tipo de la estructura

La recomendación general para el uso de aisladores sísmicos es en estructuras de nivel 1, ya sean centros hospitalarios, edificios destinados para vivienda, edificios estatales, entre otros. Sin embargo, se puede usar en estructuras de menor riesgo para la disipación de sismos sin pérdidas económicas significativas, ya sea el caso de bodegas, parqueaderos, centros comerciales, etc. (Genatios & Lafuente, 2016)

5.3.4 Diseño de la aislación sísmica

Al diseñar la aislación sísmica y crear un modelo matemático para simular el comportamiento estructural durante eventos sísmicos, es esencial considerar varios elementos para garantizar un análisis preciso y efectivo.

5.3.4.1 Distribución de masa y rigidez

La distribución de masa y rigidez en la estructura impacta en su respuesta sísmica. Se deben modelar con precisión las características geométricas y la disposición de los elementos estructurales. (Genatios & Lafuente, 2016)

5.3.4.2 No linealidad del material

En situaciones de grandes deformaciones, la no linealidad del material debe ser considerada para un análisis más preciso.

5.3.4.3 Propiedades de los materiales

Se deberá conocer un diagrama de esfuerzo deformación del material a ser utilizado en la aislación sísmica, que van desde conocer las propiedades específicas del caucho, el acero y el plomo para un modelo matemático acertado. (Consulting, 2022). De los que se puede nombrar son los siguientes:

- Módulo de cizallamiento “G”
- Módulo de compresibilidad “K”
- Tensión de fluencia “Fy”
- Amortiguamiento efectivo “BD”

5.3.4.4 Tipos de rigidez necesarias para el diseño del aislador

5.3.4.4.1 Rigidez horizontal requerida

Capacidad de una estructura para resistir desplazamientos laterales, como los generados por vientos fuertes o sismos. Es esencial para mantener la estabilidad y la integridad de la estructura durante eventos que ejercen fuerzas horizontales. (Consulting, 2022)

$$K_{Hsist} = \frac{W_t}{g} \left(\frac{2\pi}{T_D} \right)^2$$

K_{Hsist} Rigidez horizontal requerida

W_t Peso total del edificio

g Aceleración de la gravedad

T_D Período preliminar

5.3.4.4.2 Rigidez efectiva

Se refiere a la capacidad de una estructura o componente para resistir deformaciones bajo cargas aplicadas. Este término se utiliza a menudo en el contexto de análisis estructural para describir cómo la rigidez real de un elemento, que puede verse afectada por factores como la geometría, los materiales y las condiciones de apoyo, se traduce en un comportamiento estructural específico.

$$K_{eif} = \frac{W_{RD}}{g} \left(\frac{2\pi}{T_D} \right)^2$$

K_{eif} Rigidez efectiva

W_{RD} Carga axial del edificio

g Aceleración de la gravedad

T_D Período preliminar

5.3.4.4.3 Rigidez postfluencia

Capacidad de un elemento estructural para resistir deformaciones significativas después de haber alcanzado el punto de fluencia o el inicio de comportamiento plástico. (Consulting, 2022)

$$K_d = K_{Hsist} - \frac{Q_d}{D_D}$$

K_d Rigidez postfluencia

K_{Hsist} Rigidez horizontal requerida

Q_d Esfuerzo característico

D_D Desplazamiento de diseño

5.3.4.4.4 Rigidez elástica

Capacidad de un material o estructura para recuperar su forma original después de ser sometido a deformaciones temporales bajo cargas. Es una medida de la resistencia del material a la deformación reversible, cumpliendo con la ley de Hooke en la que el esfuerzo es proporcional a la deformación.

$$K_u = 10K_d$$

K_u Rigidez elástica

K_d Rigidez postfluencia

5.3.4.4.5 Rigidez de los elementos

$$K_{pb} = \frac{Q_{Dd}}{D_D} \text{ (Plomo)} \quad K_{LDR} \text{ (Aislador LDR)} \quad K_{LRB} \text{ (Aislador LRB)}$$

K_{pb} Rigidez del elemento del núcleo de plomo

Q_{Dd} Esfuerzo característico de desplazamiento de diseño

D_D Desplazamiento de diseño

K_{LDR} Rigidez del elemento aislador tipo LDR

K_{LRB} Rigidez del elemento aislador tipo LRB

5.3.4.4.6 Rigidez total del sistema

Se refiere a la rigidez global completo de toda la aislación.

$$K_{dsist} = K_{Hsist} - \frac{Q_{Dd}}{D_D}$$

K_{dsist} Rigidez total del sistema

K_{Hsist} Rigidez horizontal del sistema

Q_{Dd} Esfuerzo característico del desplazamiento de diseño

D_D Esfuerzo característico del desplazamiento de diseño

5.3.4.5 Período de vibración de la estructura aislada

Período de vibración que tendrá la estructura aislada en el momento de un sismo, teniendo en cuenta los casos de carga estáticas y dinámicas. (Consulting, 2022)

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{W_t}{g * K \sum H}} \quad 2.5 \geq T \leq 3 \quad (\text{Seg})$$

T Período de vibración de la estructura aislada

W_t Peso total de la edificación

g Aceleración de la gravedad

$K \sum H$ Sumatoria de rigideces horizontales

5.4 Criterios de comparación

Para la comparativa se tomará en cuenta los siguientes criterios de comparación para definir sus ventajas y desventajas en cada caso estructural.

- Desplazamientos
- Derivas de pisos
- Mitigación de fuerzas
- Seguridad estructural
- Costos

6. Resultados

Los resultados obtenidos fueron modelados a través de un software que usa elementos finitos, en el cual se aplican todos los fundamentos matemáticos nombrados anteriormente con sus condiciones de carga.

6.1 Diseño arquitectónico preliminar

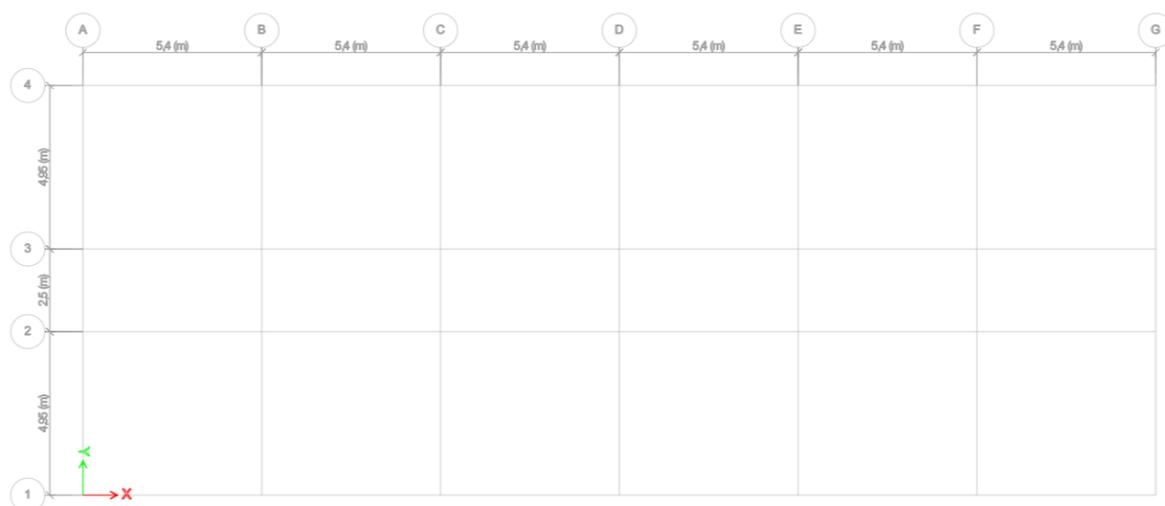
Este apartado es necesario conocer la distribución tanto en planta como en elevación de los elementos estructurales planteados inicialmente. Esto define los ejes y espaciamientos necesarios para la correcta funcionalidad de la edificación



Figura 6: Planta baja de la edificación



Figura 7: Planta tipo de la edificación



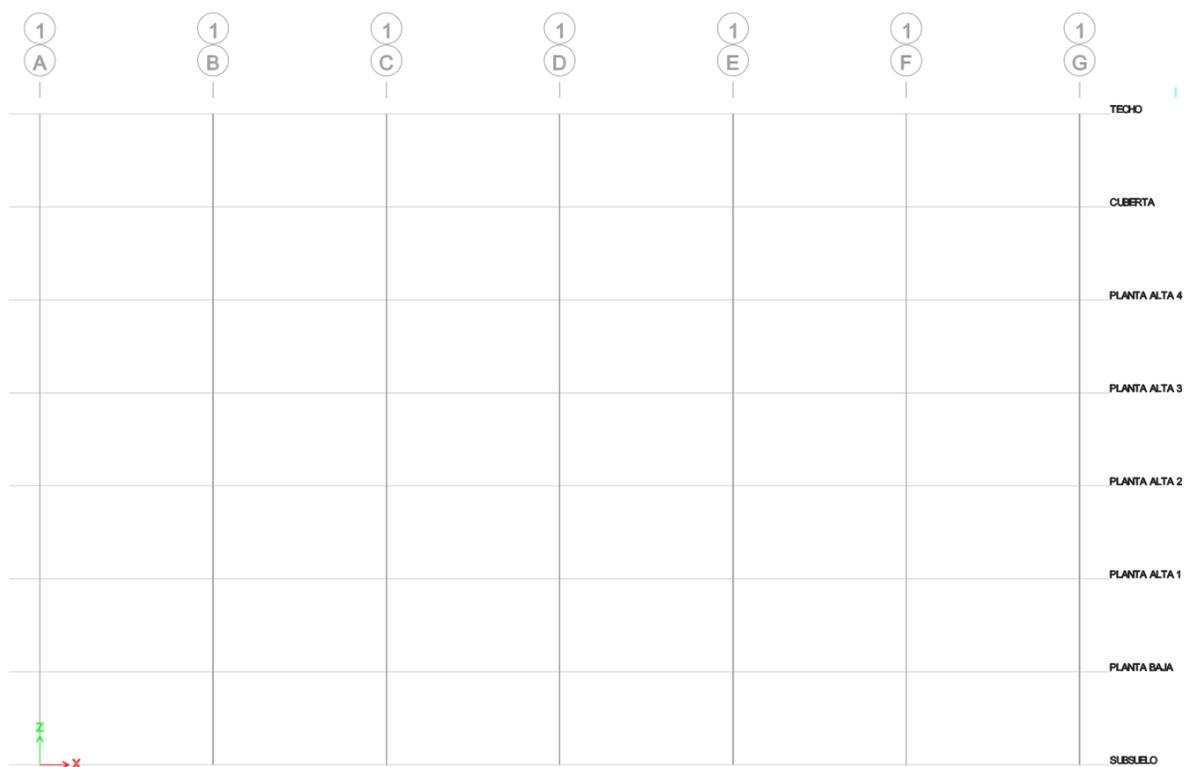


Figura 8: Definición de ejes en planta y elevación. Altura entrepiso: 2.9m

6.2 Definición de materiales

Los modelos matemáticos de las edificaciones poseen elementos de hormigón armado de calidad $f'c = 240 \text{ kg/cm}^2$, con barras de acero de refuerzo $Fy = 4200 \text{ kg/cm}^2$, ASTM A615 Gr 60. Para la evaluación de las cargas gravitacionales de la estructura el peso unitario considerado para el hormigón es de 2.40 tn/m^3 . En la evaluación de la rigidez, el módulo de elasticidad considerado para el hormigón es de $Ec = 218436.26 \text{ kg/cm}^2$. Las propiedades de los materiales utilizados en el modelo estructural se indican a continuación.

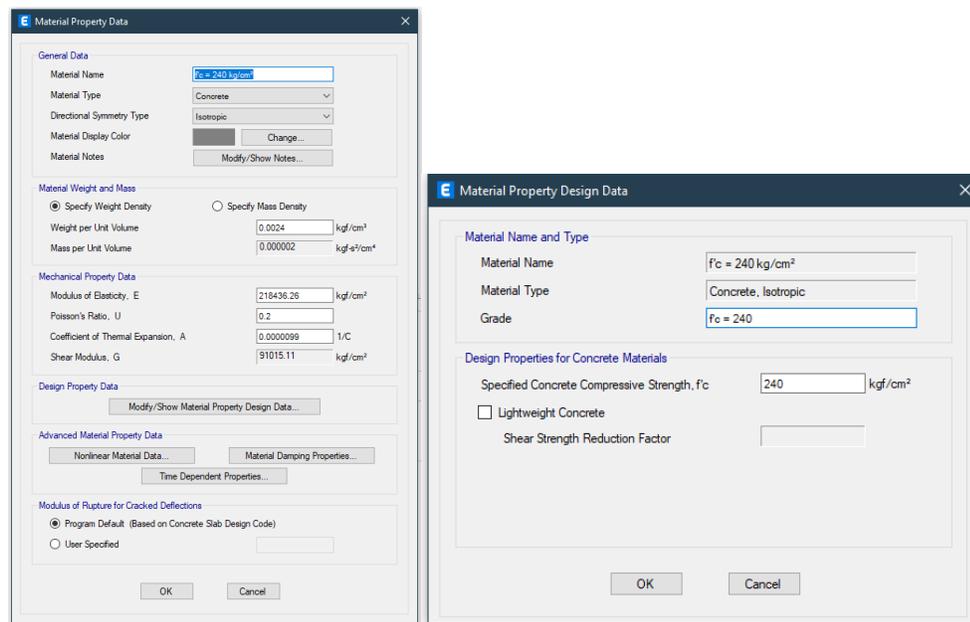


Figura 9: Propiedades del Hormigón

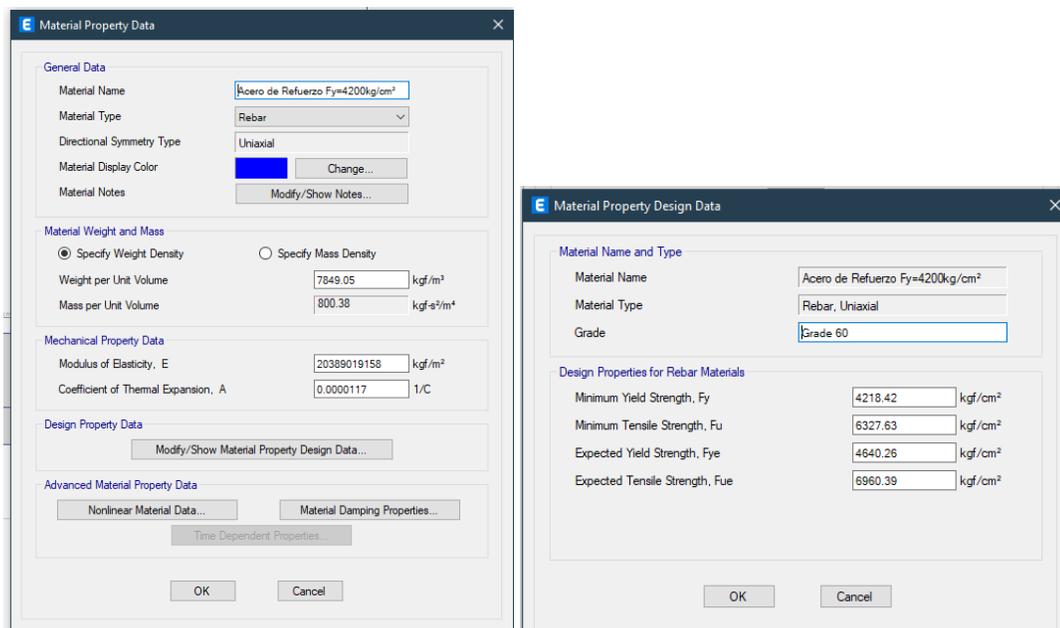


Figura 10: Propiedades del Acero

6.3 Casos de carga

- Las cargas gravitacionales permanentes (D) consideradas en el diseño de la estructura incluyen el peso propio de los elementos estructurales, el que se

incorpora automáticamente a través del modelo estructural, así como el peso de elementos no estructurales tales como las paredes y pisos. Se consideró sobre las losas del entrepiso una sobrecarga muerta $D= 250 \text{ Kgf/m}^2$.

- En cuanto a la Carga viva (L) a aplicarse en las losas se consideró, en las losas de entrepiso el valor de carga viva un poco más conservador que el indicado en la NEC para el caso de viviendas, $L= 200 \text{ kgf/m}^2$, de acuerdo con lo establecido en la NEC-2015.

6.4 Combinaciones de carga

La combinación de carga de diseño siempre será la más desfavorable para cada elemento.

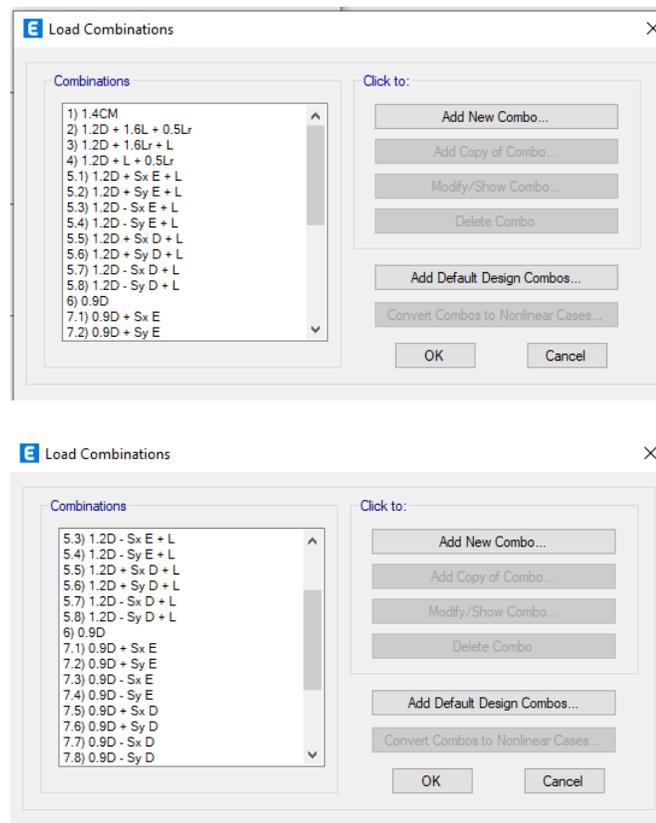


Figura 11: Combinaciones de carga

6.5 Predimensionamiento de elementos estructurales

6.5.1 Vigas

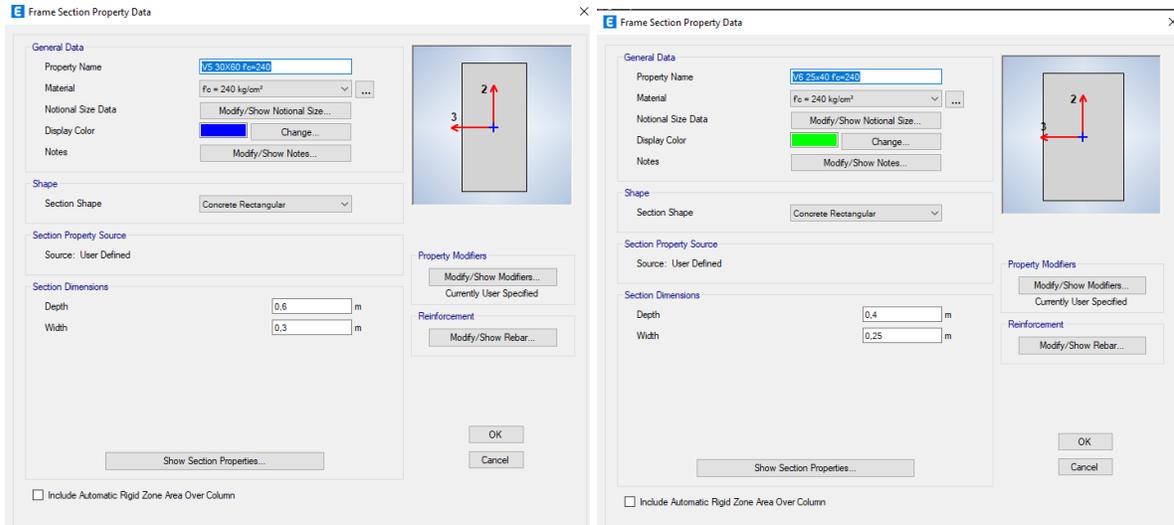


Figura 12: Predimensionamiento de vigas

6.5.2 Columnas

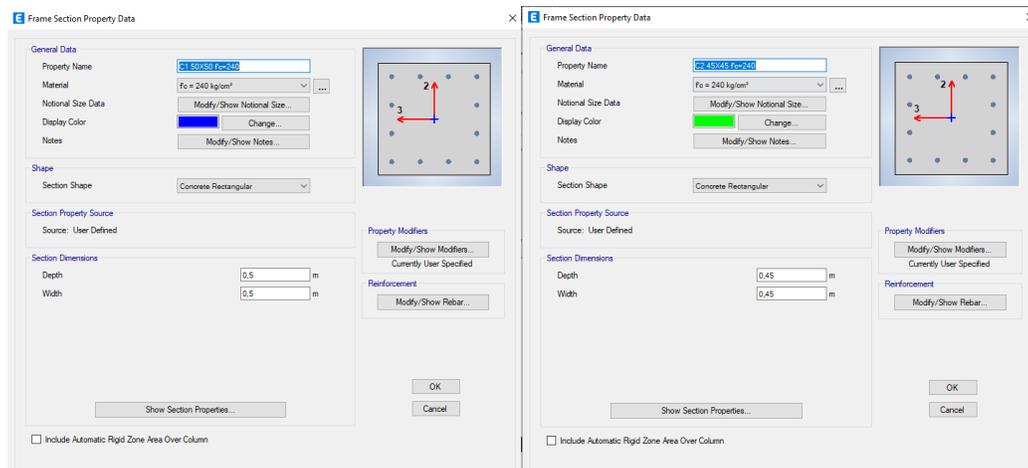


Figura 13: Predimensionamiento de columnas

6.5.3 Losas

Figura 14: Predimensionamiento de losa aligerada de 20cm

6.6 Diseño sismorresistente

6.6.1 Período fundamental

- **Método 1**

$$T = 0.8262 \text{ seg}$$

- **Método 2**

$$T_a = 1.018 \text{ seg}$$

6.6.2 Cargas sísmicas

6.6.2.1 Cortante Basal de diseño

$n = 2.48$ (Provincias de la sierra)

$r = 1$ (Para todos los suelos, con excepción del suelo tipo E)

$S_a = 0.403$

- Factor de reducción de las fuerzas sísmicas $R = 8$

- El coeficiente de configuración estructural en planta. $\phi_p = 1$
- El coeficiente de configuración estructural en elevación. $\phi_e = 1$

$$V = 0.0503W$$

6.6.3 Espectro de diseño

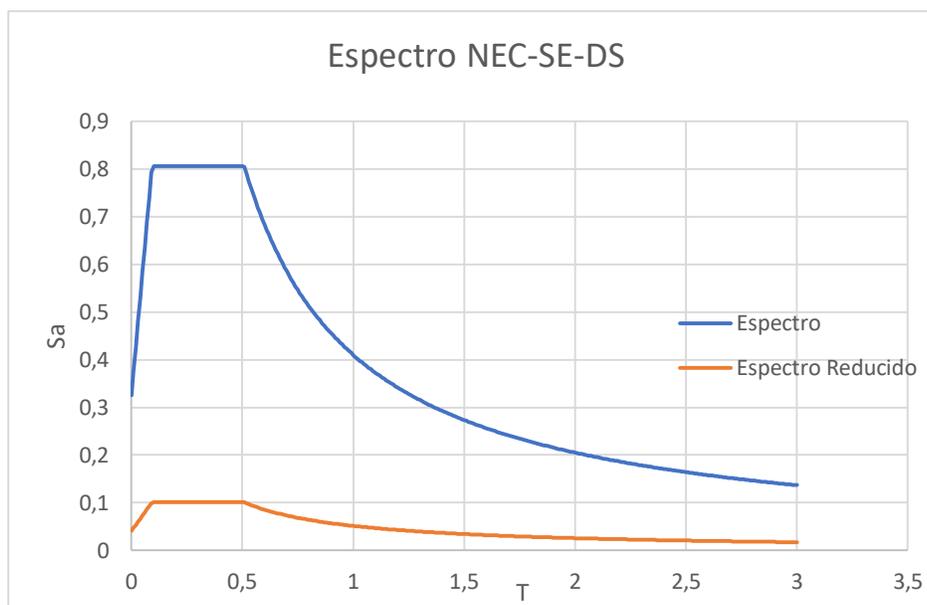
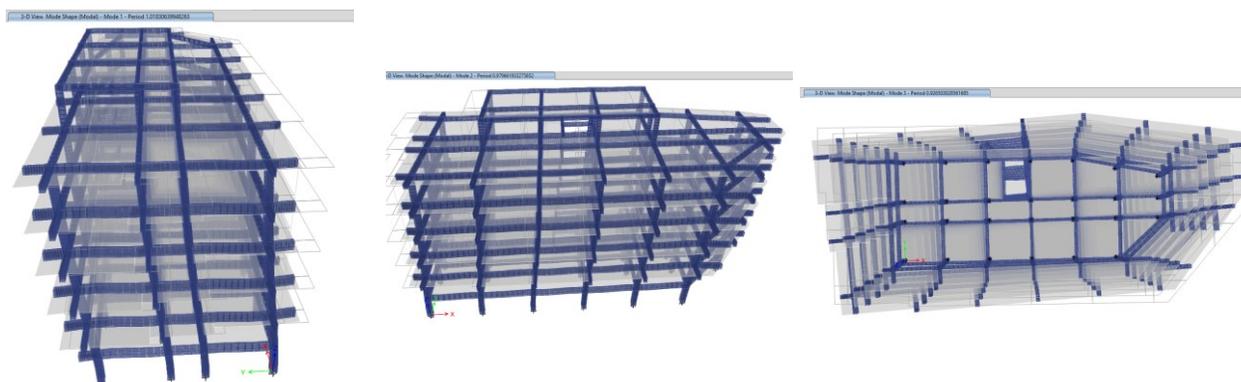


Figura 15: Espectro de diseño inelástico NEC-2015

6.6.4 Análisis Modal

Para el análisis modal se consideraron 21 modos. El periodo del modo fundamental en la dirección y es de 1.018s con un 75.86 % de masa modal en esa dirección, el periodo fundamental en la dirección X es de 0.98s con un 81.08% de masa modal y el torsional es de 0.927s con una masa modal de 78.34%. La suma de las masas modales para los 21 modos considerados es de 100 % en la dirección X, 100 % en la dirección Y, y 100 % para el grado de libertad torsional. Se trata de una estructura regular en su configuración en planta, a pesar de ello se demuestra que los modos fundamentales de vibración son de traslación en las direcciones principales de análisis.



Modo 1: Traslación en Y

T=1.018 (Seg)

Modo 2: Traslación en X

T=0.98 (Seg)

Modo 3: Rotacional

T=0.926 (Seg)

Figura 16: Modos de vibración fundamentales de la edificación

Case	Mode	Period	UX	UY	UZ	SumUX	SumUY	SumUZ	RX	RY	RZ	SumRX	SumRY	SumRZ
		sec												
Modal	1	1.018	1.78E-06	0.7586	0	1.78E-06	0.7586	0	0.1939	2.83E-05	0.0502	0.1939	2.83E-05	0.0502
Modal	2	0.98	0.8108	0.0001	0	0.8108	0.7587	0	2.82E-05	0.1993	0.0014	0.1939	0.1993	0.0516
Modal	3	0.927	0.0018	0.0501	0	0.8126	0.8089	0	0.0093	1.72E-06	0.7834	0.2032	0.1993	0.835
Modal	4	0.342	0.0016	0.0857	0	0.8142	0.8945	0	0.4751	0.0092	0.0068	0.6783	0.2085	0.8417
Modal	5	0.335	0.086	0.0025	0	0.9001	0.8971	0	0.0138	0.4996	0.0007	0.692	0.7081	0.8424
Modal	6	0.303	0.0015	0.0064	0	0.9016	0.9035	0	0.0351	0.0083	0.0828	0.7271	0.7164	0.9253
Modal	7	0.21	0.0317	0.0017	0	0.9333	0.9052	0	0.0039	0.0798	0.0021	0.731	0.7962	0.9274
Modal	8	0.208	0.0022	0.0316	0	0.9355	0.9367	0	0.0721	0.0053	0.0011	0.8032	0.8015	0.9285
Modal	9	0.182	0.0011	0.001	0	0.9366	0.9377	0	0.002	0.0023	0.0222	0.8051	0.8038	0.9507
Modal	10	0.149	0.0185	0.0002	0	0.9551	0.938	0	0.0006	0.0515	0.0001	0.8057	0.8553	0.9507
Modal	11	0.148	0.0009	0.0159	0	0.956	0.9539	0	0.0457	0.0026	0.0016	0.8514	0.8578	0.9523
Modal	12	0.146	0.0007	0.0037	0	0.9567	0.9576	0	0.0118	0.0021	0.0102	0.8632	0.8599	0.9625
Modal	13	0.111	0.0109	0.0001	0	0.9675	0.9577	0	0.0001	0.0346	0.005	0.8634	0.8945	0.9676
Modal	14	0.109	0.0001	0.0166	0	0.9677	0.9743	0	0.0527	0.0003	2.06E-06	0.916	0.8948	0.9676
Modal	15	0.108	0.0064	0.0001	0	0.974	0.9744	0	0.0002	0.0201	0.0094	0.9162	0.9149	0.977
Modal	16	0.081	0.0049	0.0073	0	0.979	0.9817	0	0.0241	0.0163	0.0014	0.9403	0.9312	0.9784
Modal	17	0.081	0.0075	0.0061	0	0.9865	0.9878	0	0.0201	0.0249	0.0001	0.9604	0.956	0.9785
Modal	18	0.08	0.0016	0.0004	0	0.9881	0.9883	0	0.0014	0.0054	0.0091	0.9618	0.9614	0.9876
Modal	19	0.067	0.0022	0.009	0	0.9903	0.9972	0	0.0293	0.0072	0.0004	0.991	0.9686	0.988
Modal	20	0.067	0.0096	0.0022	0	1	0.9994	0	0.0071	0.0313	4.89E-05	0.9982	0.9999	0.988
Modal	21	0.066	2.84E-05	0.0006	0	1	1	0	0.0018	0.0001	0.012	1	1	1

Tabla 6: Relaciones de Masas Modales participantes de la edificación

6.7 Criterios de diseño

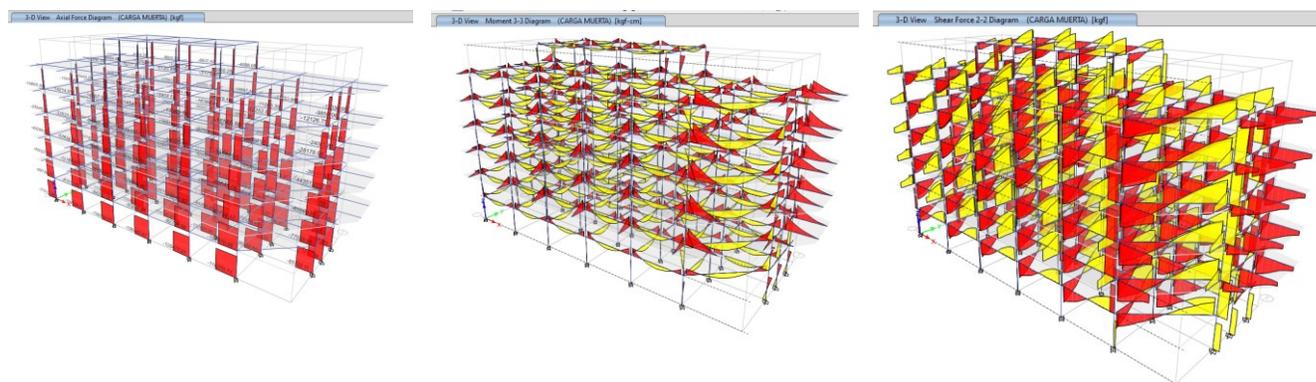


Figura 17: Diagrama de Axiales, Momentos y Cortantes por Carga Muerta.

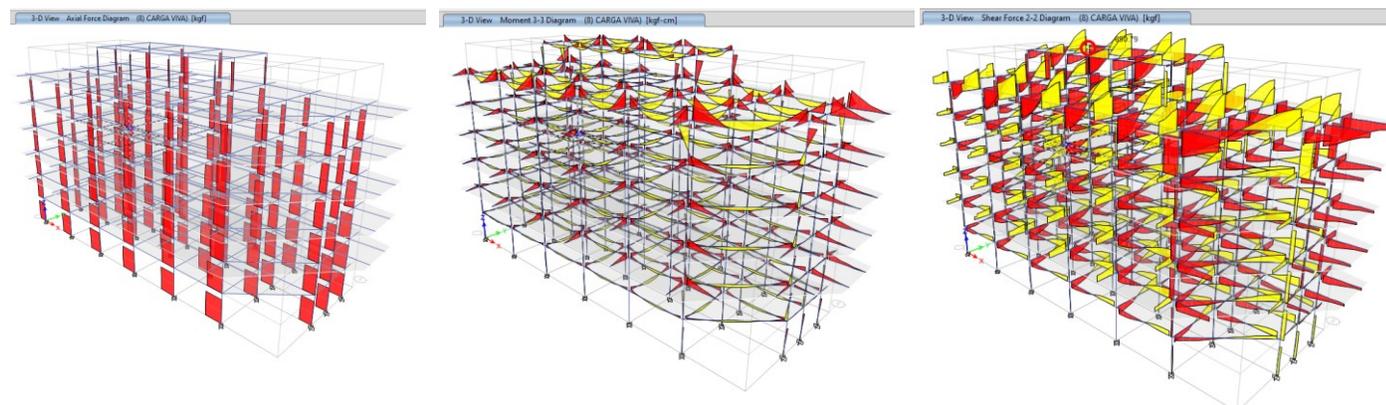


Figura 18: Diagrama de Axiales, Momentos y Cortantes por Carga Viva.

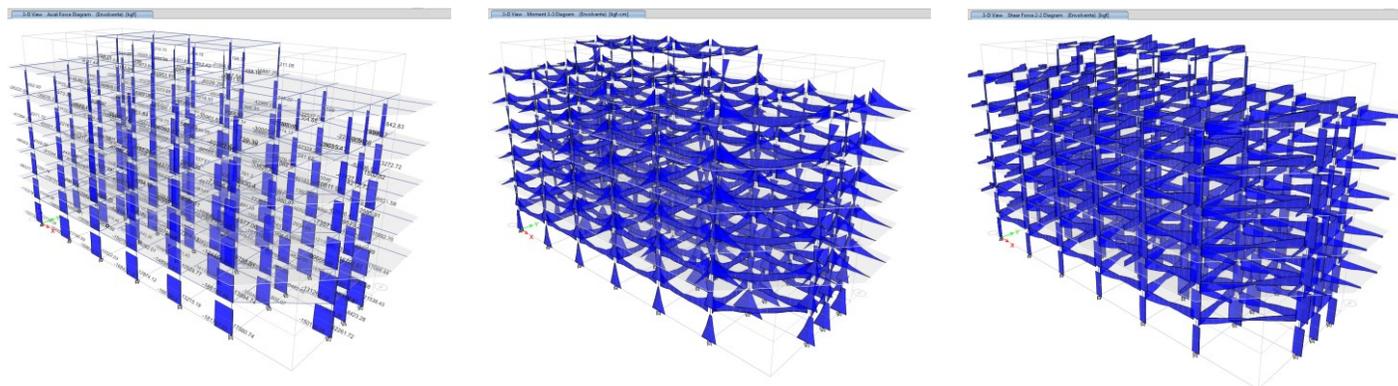


Figura 19: Diagrama de Axiales, Momentos y Cortantes para la envolvente de diseño.

6.7.1 Desplazamientos

El desplazamiento se produce tras ser aplicada la fuerza del cortante basal a la estructura, la misma debe cumplir lo establecido en la NEC-2015 del 2% para estructuras de hormigón armado sin muros portantes.

Output Case	FX tonf	FY tonf
SX E	-117.5786	0
SY E	0	-117.5786
SX D	108.5554	1.0175
SY D	1.0325	106.7467

Tabla 7: Reacciones de la base ante las cargas laterales del sismo.

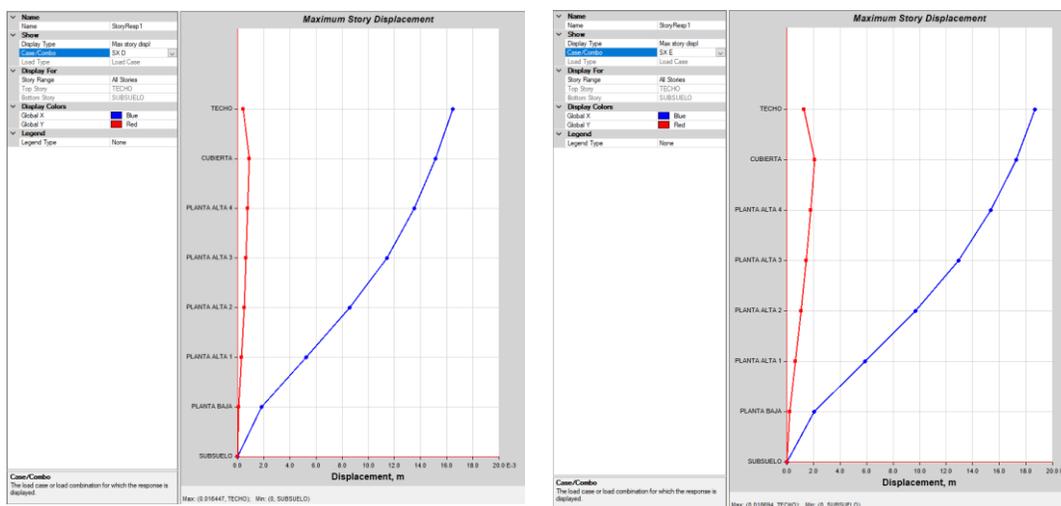


Figura 20: Desplazamiento lateral de los pisos, producto del sismo en X (Análisis Estático y Dinámico).

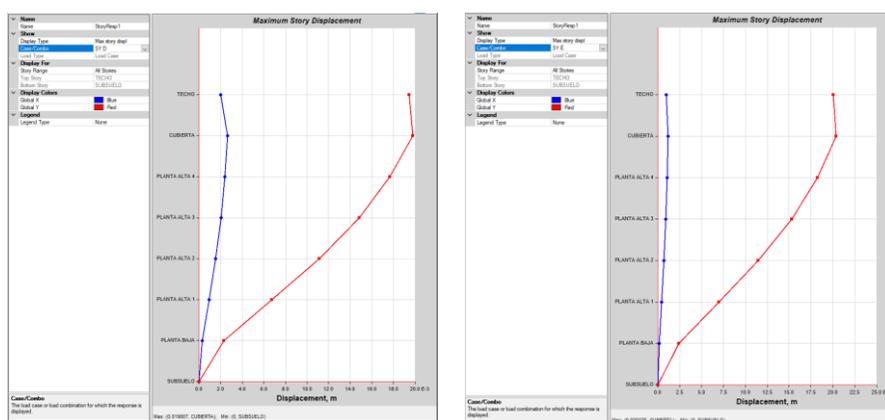


Figura 21: Desplazamiento lateral de los pisos, producto del sismo en Y (Análisis Estático y Dinámico).

6.7.1.1 Derivas de piso máximos

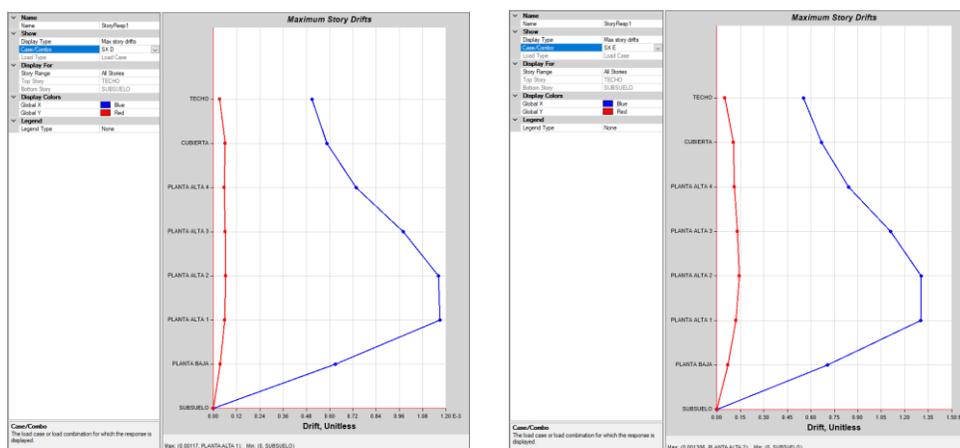


Figura 22: Derivas de piso máximos, producto del sismo en X (Análisis Estático y Dinámico).

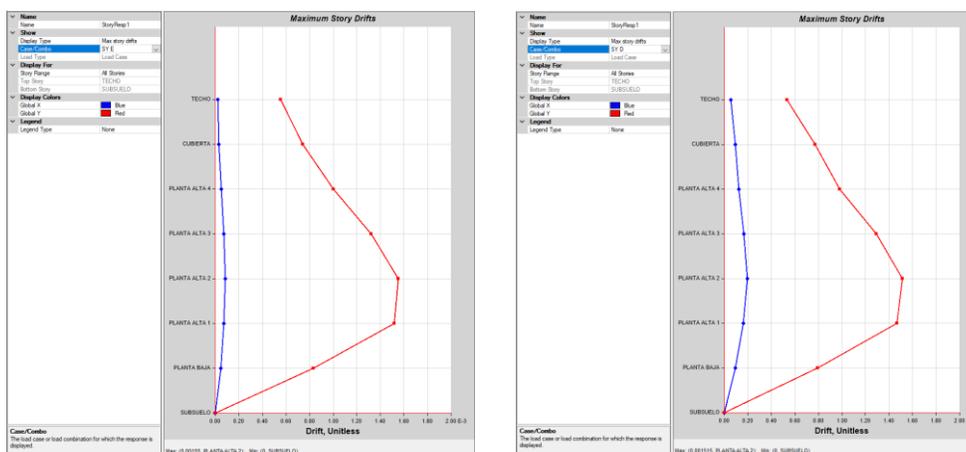


Figura 23: Derivas de piso máximos, producto del sismo en Y (Análisis Estático y Dinámico).

Se hará un control de deformaciones, a través del cálculo de las derivas inelásticas máximas de piso. El diseño deberá comprobar que la estructura presentará deformaciones inelásticas controlables, mejorando substancialmente el diseño conceptual. Los valores máximos se han establecido considerando que el calculista utilizará secciones agrietadas I_{agr} (0.5 I_g para vigas; 0.8 I_g para columnas; 0.6 I_g para muros). La expresión para calcular la deriva máxima inelástica de cada piso será:

$$\Delta M_x = (0.75) (R) (\Delta E) < 2\%$$

$$\Delta M_y = (0.75) (8) (\Delta E) < 2\%$$

ΔM deriva máxima inelástica

ΔE desplazamiento obtenido en aplicación de las fuerzas laterales de diseño reducidas

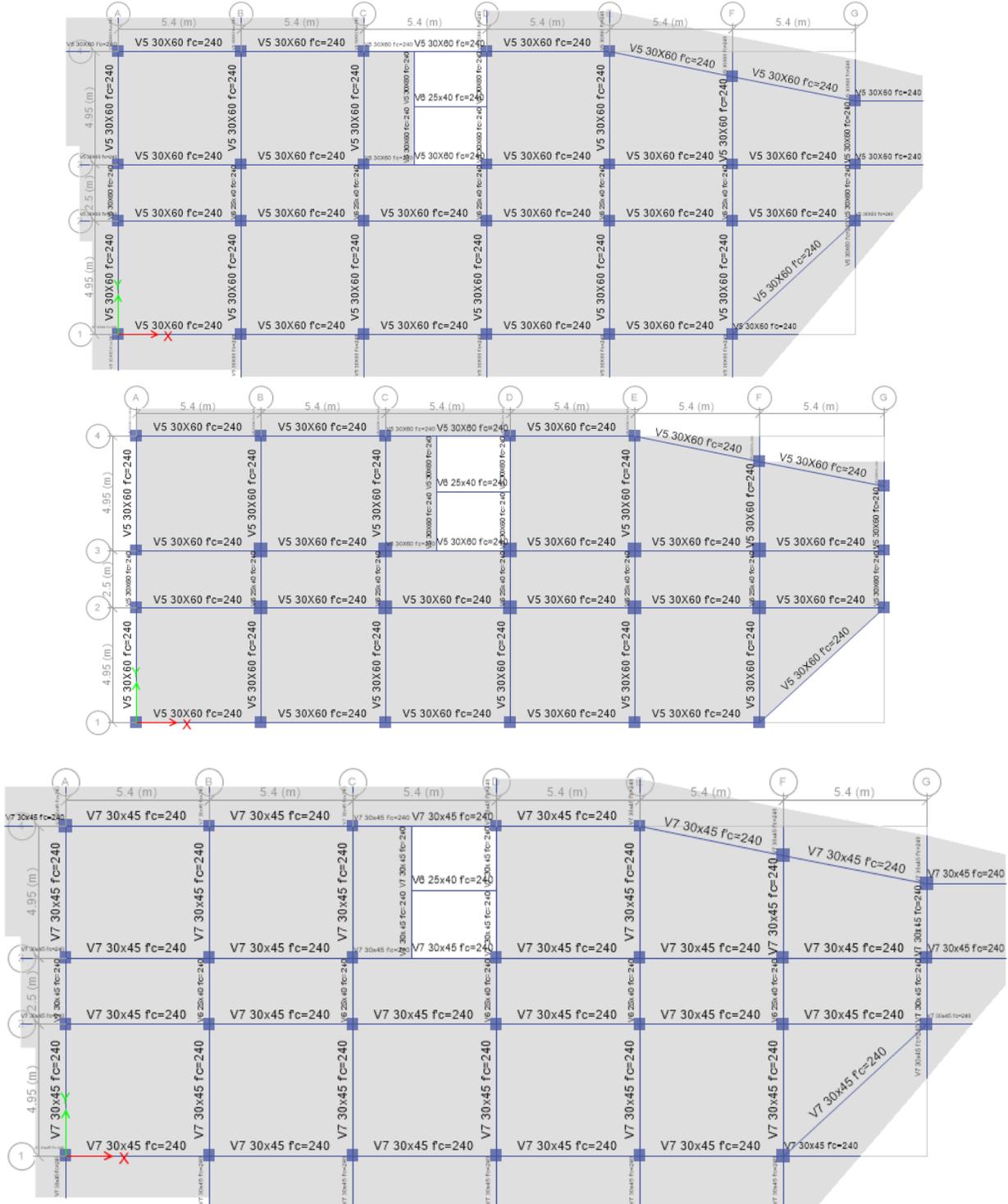
R factor de reducción de resistencia

- $\Delta M_x = (0.75) (8) (0.001306) = 0.007836 = 0.78\% < 2\%$
- $\Delta M_y = (0.75) (8) (0.001550) = 0.0093 = 0.93\% < 2\%$

El análisis de las derivas de piso, tanto en el sentido X como en el sentido Y de las estructuras, muestran que se está dentro del límite mencionado en la NEC, el cual se ha fijado en 2% de la deriva entrepiso para estructuras de hormigón armado.

6.7.2 Rediseño de elementos estructurales

6.7.2.1 Diseño definitivo de vigas



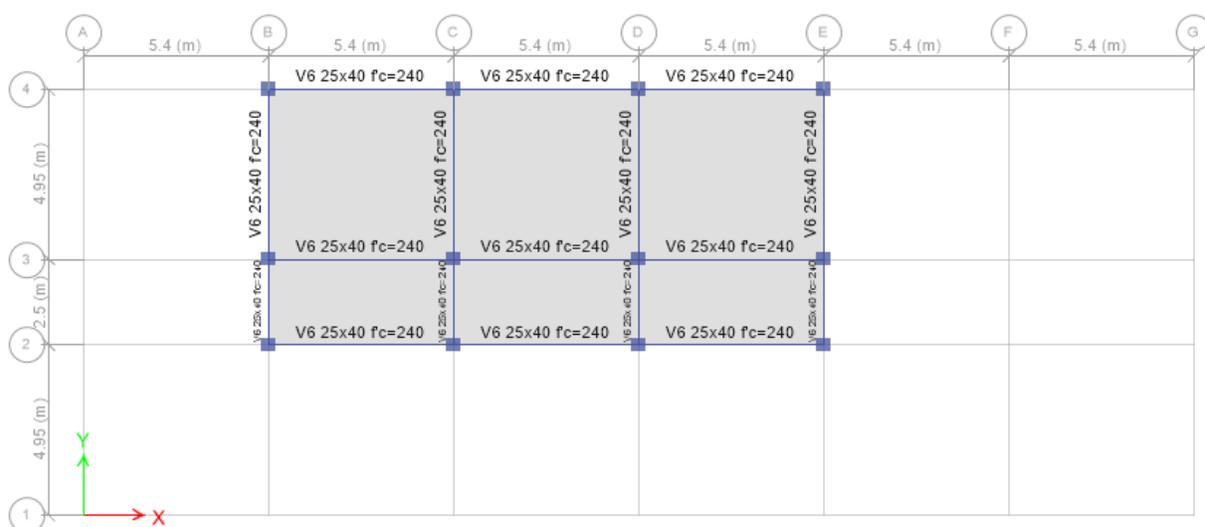
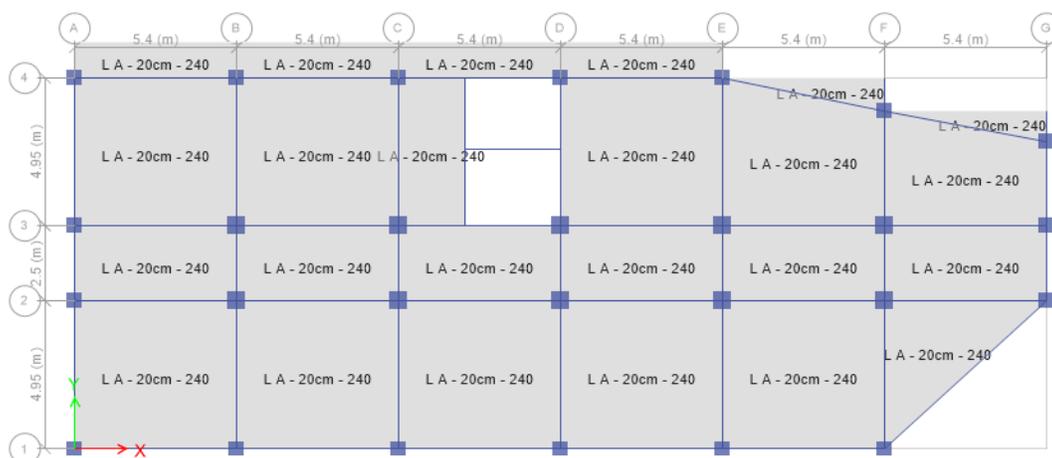


Figura 24: Secciones de vigas diseñadas.

6.7.2.2 Diseño definitivo de Losas

Las losas de entrepiso serán aligeradas, de 20cm de espesor, de hormigón armado con acero de refuerzo en dos direcciones ortogonales. Se consideran sustentadas perimetralmente en cada uno de los paños por las vigas que conforman los pórticos y las vigas secundarias incluidas en las plantas.



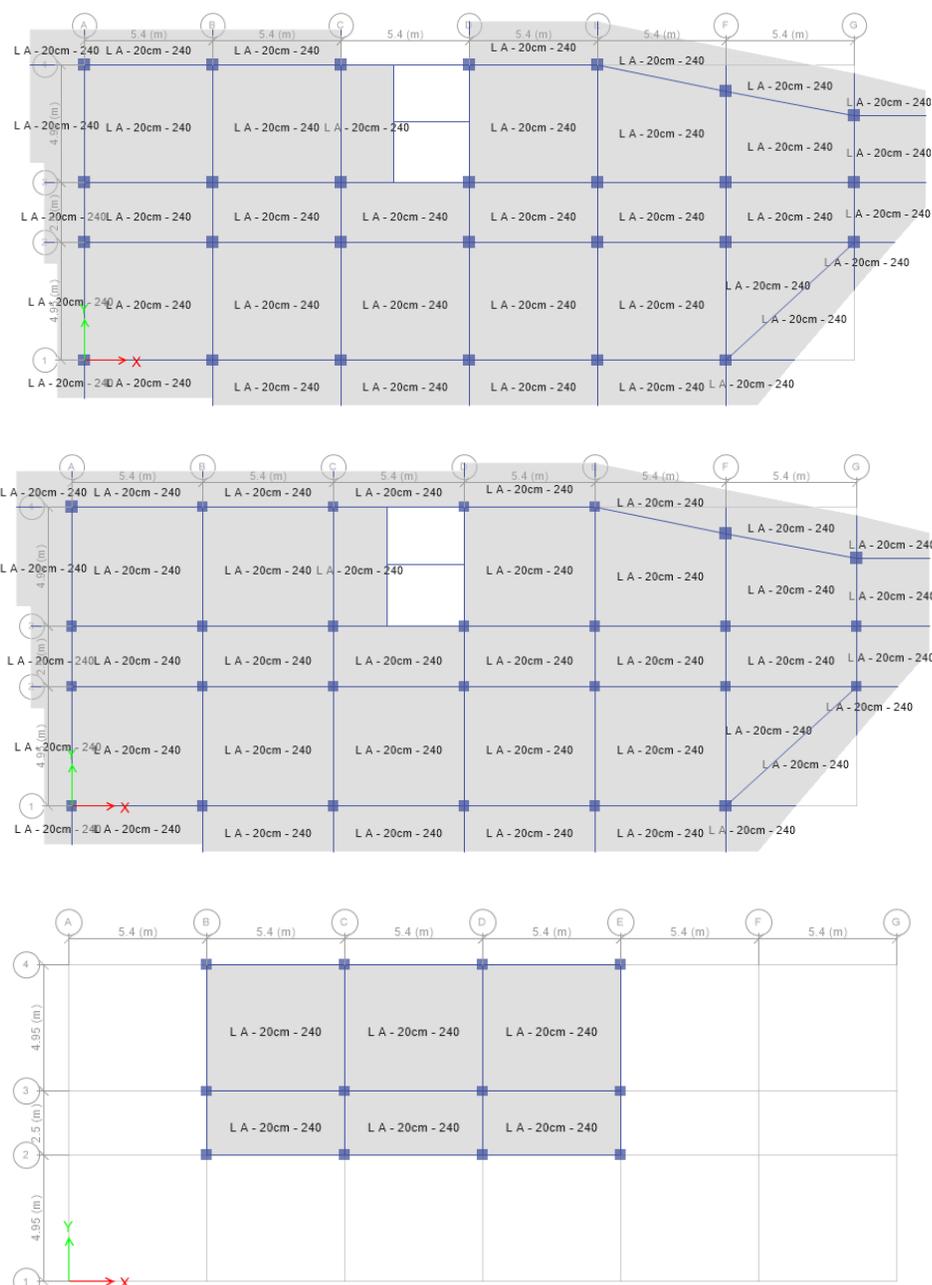


Figura 25: Planta de la losa de entpiso.

6.7.2.3 Diseño definitivo de Columnas

Se pudo observar que el área de acero longitudinal requerida en la mayoría de las columnas es la mínima, es decir, el 1% del área de la sección transversal de las columnas, lo que indica que las secciones de diseño soportan los esfuerzos a las que están sometidas.

Ninguna de las columnas se reforzará con una cuantía inferior a la mínima (1%) ni mayor a la máxima (3%) de acuerdo con lo indicado en la NEC2015. Ha sido necesario el aumento de sección y de cuantía debido al requisito de tener en todos los casos columnas fuertes y vigas débiles. Las secciones típicas de las columnas son de 60x60cm, 50x50cm, 45x45cm, y de 40x40cm. Las secciones iniciales tenían una geometría cuadrada de 60x60cm en la planta de subsuelo y planta baja, de 50x50cm en la planta alta 1, 2 y 3, y secciones de 40x40 en la planta alta 4 y la cubierta.



Figura 26: Secciones de columnas

6.7.3 Comprobaciones

El acero de refuerzo tanto longitudinal como transversal resultante de diseño, ha sido transformado en áreas de varillas comerciales de nuestro medio para armar las secciones de columnas de la estructura tal y como se indican en los planos estructurales. En el diseño se presentan columnas de 50x50 las cuales el armado consiste en la equivalencia a una cuantía del 37.7 % y el acero de confinamiento consiste en estribos cerrados de 10mm cada 10-15-10 cm (estribos sin dejar varillas principales sueltas). El armado provisto en las columnas ha sido necesario para garantizar evitar la formación de rótulas plásticas en las columnas; cumpliendo el criterio de diseño por capacidad de contar con columnas fuertes y vigas débiles cuya comprobación se muestra a continuación.

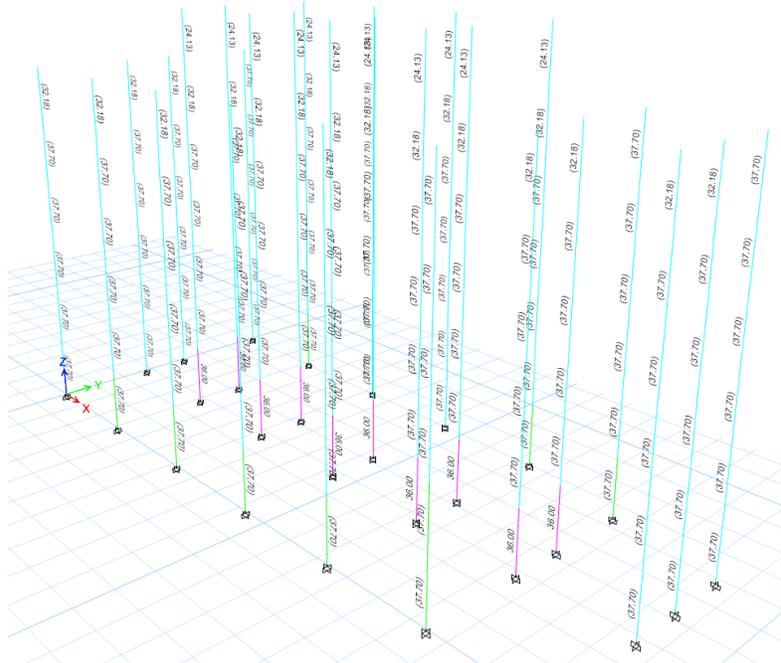
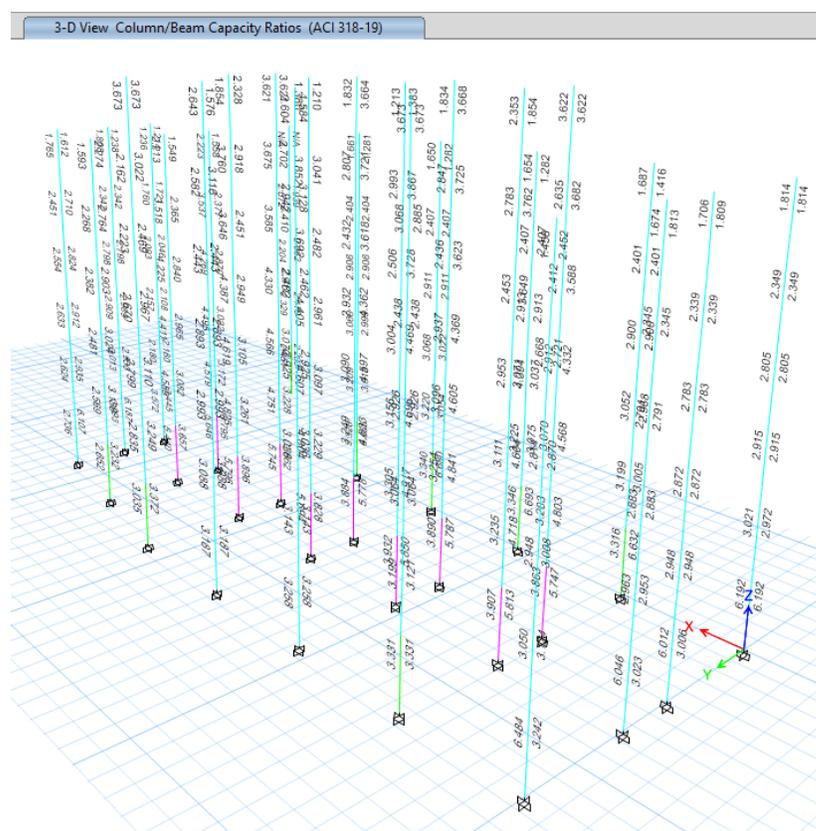
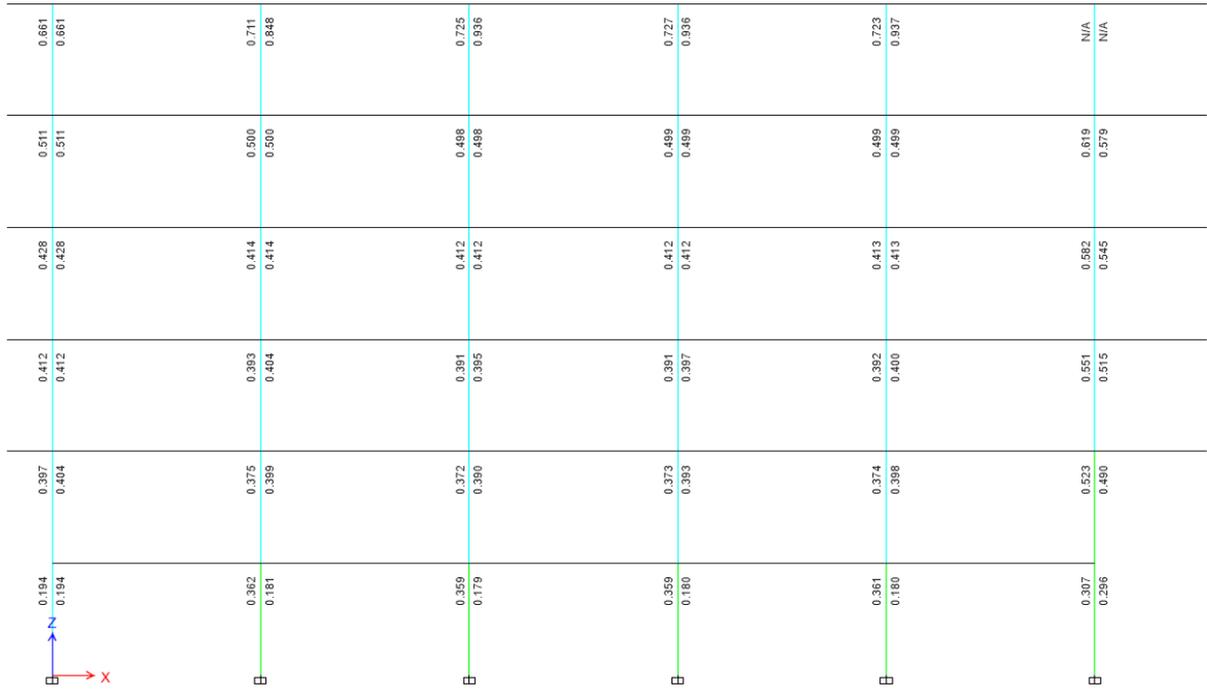


Figura 27: Cuantía de acero longitudinal en columnas.

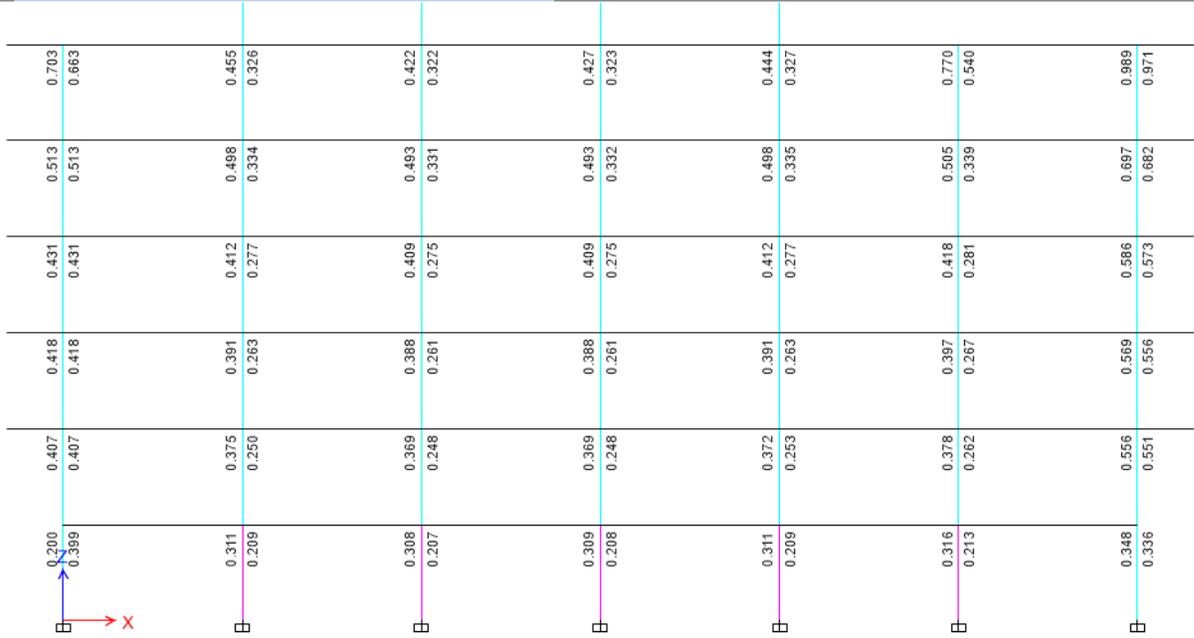
En el análisis realizado, se llevaron a cabo comprobaciones del nudo referidas a la verificación del criterio de columna fuerte- viga débil. Así como también se verificó la capacidad al corte de los nudos. Se recalca el hecho de que estas comprobaciones se llevaron a cabo en todos los nudos usando las consideraciones estipuladas en las especificaciones del ACI 318-19, en su capítulo 15, Nudos Viga-Columna y Losa-Columna. Se muestra la verificación de la relación de Capacidad $(6/5 \text{ Viga})/Columna$, en que se comprueba el tener vigas dúctiles en relación con las columnas. Se muestra la verificación de la Relación de Capacidad a Corte de los nudos de Hormigón Armado. En las uniones viga-columna prevalecerá el acero de corte proveniente de la columna debiéndose colocar como refuerzo en todos los nudos.



Elevation View - 1 (6/5) Beam/Column Capacity Ratios (ACI 318-19)



Elevation View - 2 (6/5) Beam/Column Capacity Ratios (ACI 318-19)



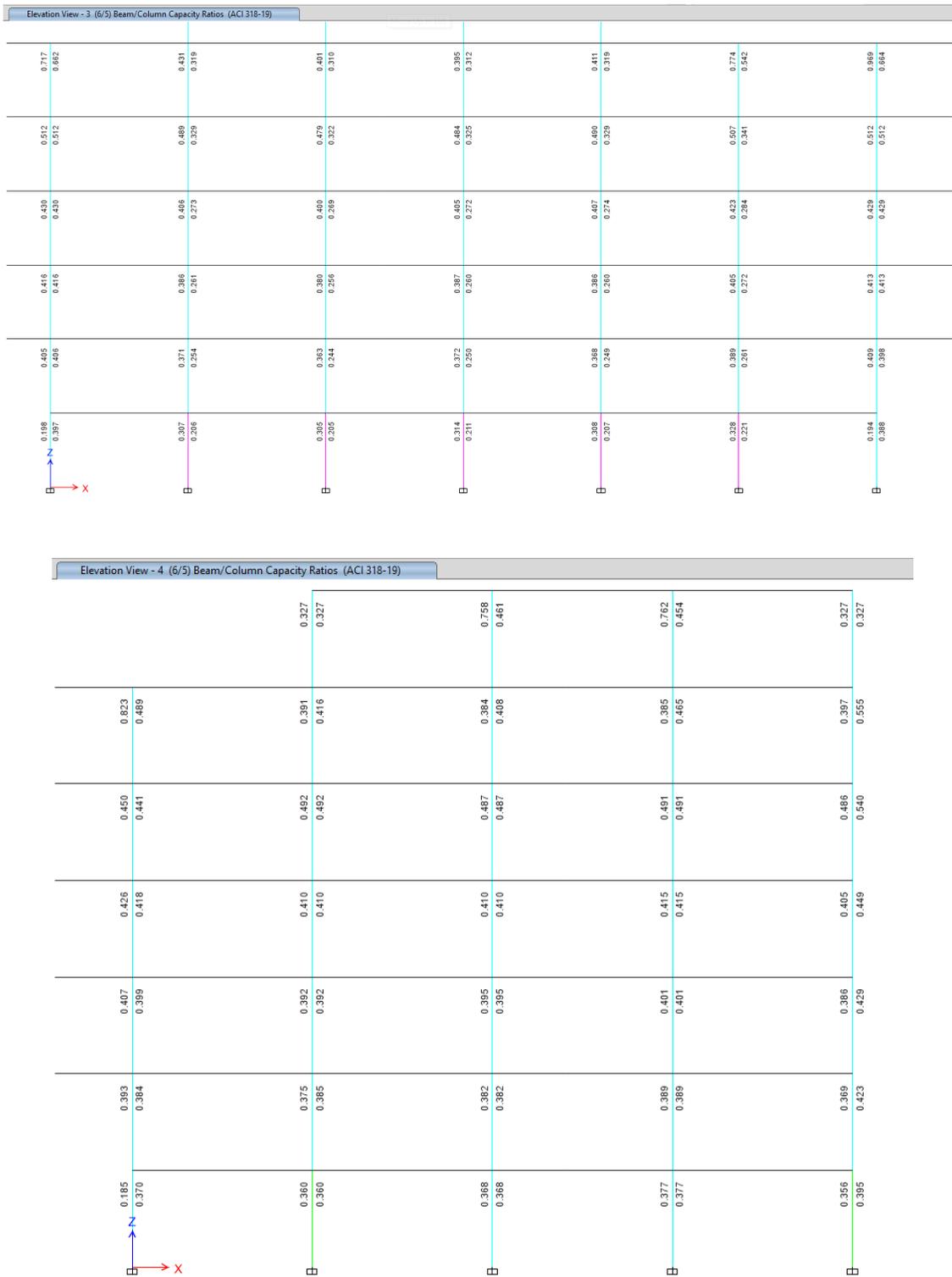


Figura 29. Verificación de la capacidad (Columna/Viga).

6.8 Diseño de la aislación sísmica

A continuación, se presentan todos los resultados obtenidos del diseño de aislación sísmica, que son esenciales para la entrada al modelado matemático de la estructura. Estos resultados abarcan aspectos cruciales como las propiedades de los materiales, las características del suelo, la distribución de masas y rigideces, así como la especificación de los dispositivos de aislación sísmica utilizados. La recopilación detallada de estos datos proporciona la base necesaria para construir un modelo matemático preciso que simule el comportamiento de la estructura ante cargas sísmicas, permitiendo un análisis integral y eficaz de su respuesta y rendimiento estructural.

$R = 8,00$		Factor de reducción sísmica
$w_t = 4918,01$	TON	Peso total de la edificación
$n_{rb} = 23,00$	#	Número de apoyos de la estructura
$w_{rb} = 181,44$	TON	Carga axial que recibe cada aislador (MAYOR)
$T_{fb} = 1,01$	seg	Periodo de la estructura calculado con base fija
$S_{a1} = 1,01$	g	Aceleración espectral máxima
$T_{dpre} = 3,04$	seg	Periodo preliminar del aislador sísmico
$T_D = 3,00$	seg	Periodo del aislamiento
$R_i = 2,00$		Coefficiente de reducción sísmica para sistema aislado
$B_D = 0,15$		Amortiguamiento efectivo / fracción de amortiguamiento crítico)
$B = 1,38$		Factor de reducción de amortiguamiento
$G = 41,65$	TON/m ²	Módulo de cizallamiento del caucho
$K = 200722,27$	TON/m ²	Módulo de compresibilidad del caucho
$D_D = 0,54$	m	DESPLAZAMIENTO DE DISEÑO
$K_{HSIST} = 2199,06$	TON/m	RIGIDEZ HORIZONTAL REQUERIDA
$K_{eif} = 81,13$	TON/m	1RA ESTIMACIÓN DE LA RIGIDEZ HORIZONTAL DEL AISLADOR
$W_{dsist} = 613,30$	TON*m	Energía que disipa el aislador por ciclo
$Q_d = 281,86$	TON	Área del diagrama de histéresis / Esfuerzo característico
$K_D = 2198,60$	TON/m	RIGIDEZ POSTFLUENCIA
$K_u = 21986,03$	TON/m	RIGIDEZ DE DESCARGA
$D_y = 0,01424$	m	DESPLAZAMIENTO DE FLUENCIA
$F_{yPB} = 1038,74$	TON/m ²	Tensión de fluencia del PLOMO
$\Delta_{PB\text{TOTAL}} = 0,271$	m ²	Area total de la sección transversal del núcleo de plomo requerido para todo el sistema de aislamiento
$n_{LRB} = 18$		Total de aisladores elastoméricos CON NUCLEO DE PLOMO
$n_{LDR} = 5$		Total de aisladores elastoméricos SIN NUCLEO DE PLOMO
$\Delta_{pb} = 0,0151$	m ²	ÁREA DEL NUCLEO DEL PLOMO
$\phi_{pb} = 0,139$	m	Diámetro del núcleo de plomo del aislador elastomérico
$\phi_{Dpb} = 14$	cm	DÍAMETRO DE DISEÑO
$\Delta_{Dpb} = 0,0154$	m ²	ÁREA DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL
$\Delta_{Dpb\text{TOTAL}} = 0,28$	m ²	AREA TOTAL DE DISEÑO

Q_{0d} = 287,82	TON	Esfuerzo característico RECALCULADO
K _{pb} = 529	TON/m	RIGIDEZ PROVISTA POR EL NÚCLEO DE PLOMO
K _{dSIST} = 1670	TON/m	RIGIDEZ DEL SISTEMA DEL CAUCHO
K _{LDRSIST} = 1670	TON/m	RIGIDEZ DEL SISTEMA DEL CAUCHO
∅ _{LDR} asum. = 0,50	m	Diámetro asumido del aislador
Δ _{LDR} = 0,196	m ²	AREA DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL DE UN AISLADOR
Δ _{TOTALLDR} = 4,52	m ²	Área total de diseño de la componente elástica
t _{rubber} = 0,113	m	Espesor de la componente elástica / espesor del caucho
S = 10		Factor de forma S varía de 8 a 10
t = 0,013	m	Espesor de la plancha de caucho
N _D = 9		LÁMINAS DE CAUCHO
t _s = 0,002	m	Espesor de lámina del Acero
N _s = 8		Número de láminas de acero
t _{cp} = 0,025	m	Espesor de Láminas de acero SUPERIOR E INFERIOR
h _{LRB} = 0,179	m	ALTURA TOTAL DEL AISLADOR LRB

Tabla 8: Factores incidentes en el cálculo de la aislación sísmica

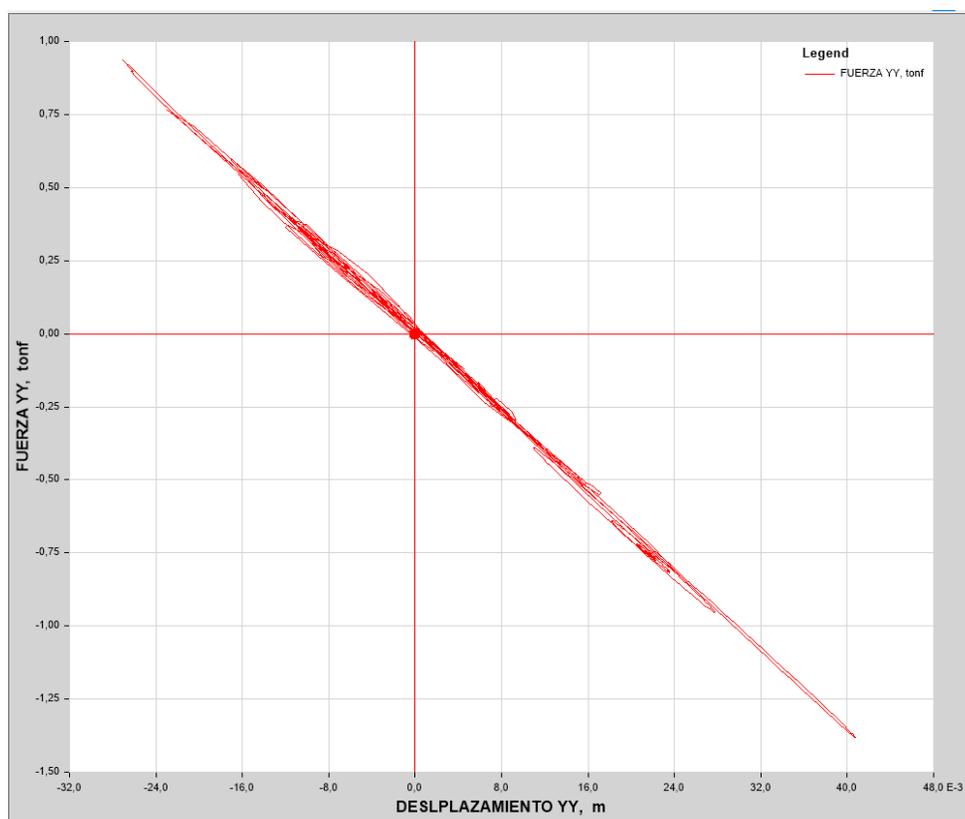


Figura 30. Diagrama de histéresis

LRB:	
$\varnothing_{LDR} = 50 \text{ cm}$	Diámetro del aislador
$h_{LRB} = 17.87 \text{ cm}$	ALTURA TOTAL DEL AISLADOR LRB
$N_D = 9$	LÁMINAS DE CAUCHO
$t = 12.5 \text{ mm}$	Espesor de la plancha de caucho
$t_s = 2 \text{ mm}$	Espesor de lámina del Acero
$N_s = 8$	Número de láminas de acero
$t_{cp} = 25 \text{ mm}$	Espesor de Láminas de acero SUPERIOR E INFERIOR

Tabla 9: Diseño definitivo del aislador sísmico

6.8.1 Análisis de respuesta sísmica

A continuación, se presentan todos los resultados derivados del análisis de respuesta sísmica de los aisladores sísmicos. Estos resultados comprenden aspectos cruciales, como los desplazamientos máximos, las fuerzas internas, y las deformaciones experimentadas por los aisladores durante eventos sísmicos simulados. La recopilación detallada de estos datos proporciona información valiosa sobre la eficacia de los aisladores sísmicos para reducir las cargas transmitidas a la estructura principal. Además, estos resultados son fundamentales para evaluar la seguridad y la capacidad de la estructura para resistir sismos, brindando una base sólida para la toma de decisiones en el diseño y la ingeniería estructural.

$K_{\Sigma} = 2199,062$	TON/m	RIGIDEZ TOTAL DEL SISTEMA DE AISLAMIENTO
$V_b = 1196,24$	TON	Cortante mínima en el nivel de la interfaz del aislamiento
$T = 3,00$	seg	Período de oscilación de la estructura aislada
$V_s = 598,122$	TON	Cortante de la super estructura
$C_s = 0,1216$		Coefficiente de amplificación
$E_c = 22223,203$	TON/m	Módulo de compresión del compuesto (CAUCHO/ACERO)
$K_{LDR} = 72,607$	TON/m	Rigidez elastomérica aporta el caucho
$K_{\Sigma LDR} = 363,03$	TON/m	Rigidez total de los aisladores elastoméricos
$K_{\Sigma LRB} = 1836,03$	TON/m	Rigidez de los aisladores con núcleo de plomo
$K_{LRB} = 102,002$	TON/m	RIGIDEZ DE UN AISLADOR CON NUCLEO DE PLOMO
$K_{\Sigma LRB rubber} = 1306,9226$	TON/m	RIGIDEZ DE LOS AISLADORES CON NUCLEO DE PLOMO
$K_{LRBpb} = 29,395$	TON/m	RIGIDEZ DEL NUCLEO DE PLOMO PARA UN AISLADOR
$F_{YSIST} = 295,359$	TON	ESFUERZO DE FLUENCIA DEL SISTEMA DE AISLAMIENTO
$F_y = 16,409$	TON	ESFUERZO DE FLUENCIA DEL UN AISLADOR
$K_{ULRB} = 30,164$	TON/m	RIGIDEZ INICIAL DE UN AISLADOR
$K_{pLRB} = 72,607$	TON/m	RIGIDEZ POSTFLUENCIA DE UN AISLADOR CON NUCLEO DE PLOMO

Tabla 10: Rigideces y esfuerzos

6.8.2 Análisis de la rigidez vertical de cada elemento

En el análisis de la rigidez vertical, se examinan las características estructurales que influyen en la capacidad de una construcción para resistir deformaciones verticales bajo cargas aplicadas. Este análisis implica evaluar la respuesta del sistema estructural ante fuerzas verticales, considerando factores como la disposición de los elementos estructurales, las propiedades de los materiales y las condiciones de apoyo. La rigidez vertical es esencial para garantizar la estabilidad y la integridad de la estructura, especialmente en situaciones donde las cargas verticales, como las provenientes de cargas gravitacionales o eventos sísmicos, son significativas. Un análisis detallado de la rigidez vertical proporciona información clave para el diseño estructural, permitiendo ajustes precisos para cumplir con los requisitos de resistencia y seguridad establecidos.

COLUMNA CENTRAL	COLUMNA EXCÉNTRICA	COLUMNA ESQUINERA
ANÁLISIS LINEAL X,Y Keif = 81,1299591	ANÁLISIS LINEAL X,Y Keif = 81,1299591	ANÁLISIS LINEAL X,Y Keif = 81,1299591
ANÁLISIS NO LINEAL KuLRB = 1,38526307 KpLRB = 3,18046139 Fy = 0,75355391	ANÁLISIS NO LINEAL KuLRB = 1,38527218 KpLRB = 2,96272129 Fy = 0,75355887	ANÁLISIS NO LINEAL KuLRB = 1,38527514 KpLRB = 2,89681603 Fy = 0,75356048
RIGIDEZ VERTICAL Kv = 1696,99971	RIGIDEZ VERTICAL Kv = 1580,82007	RIGIDEZ VERTICAL Kv = 1545,65498

Tabla 11. Factores de rigidez vertical para cada sección

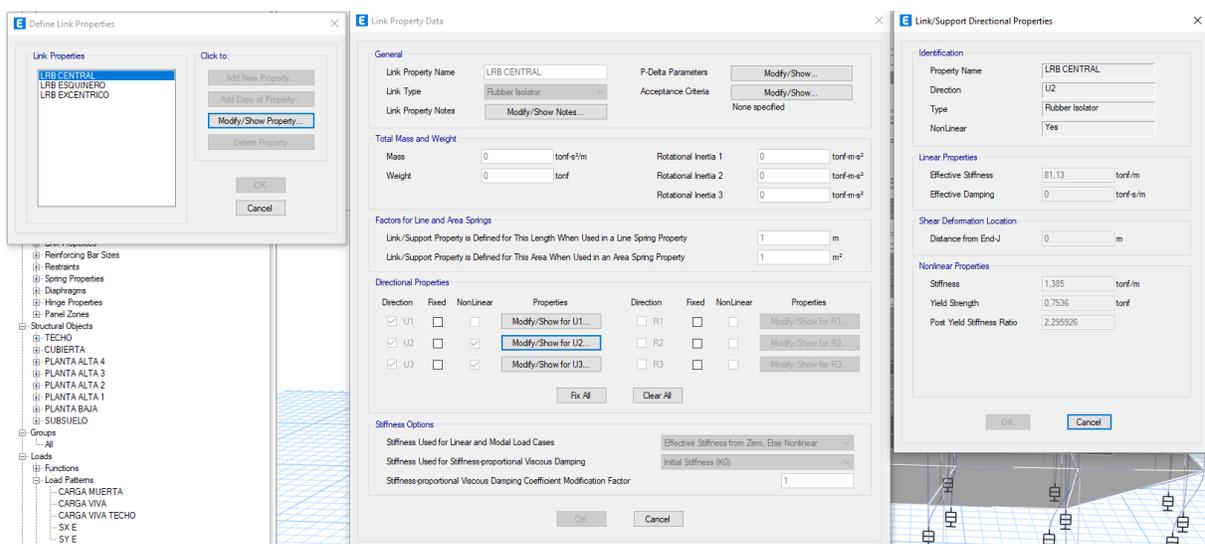


Figura 31. Creación de aisladores sísmicos en software

6.8.3 Control de daño y dispación sísmica

Se puede corroborar el control de daño de un sistema de aislación mediante una comparativa entre la aceleración espectral, y la disipación de energía que provoca el sistema de aislación sísmica. En este apartado se obtiene una disipación de mas del 60% de la fuerza total del sismo.

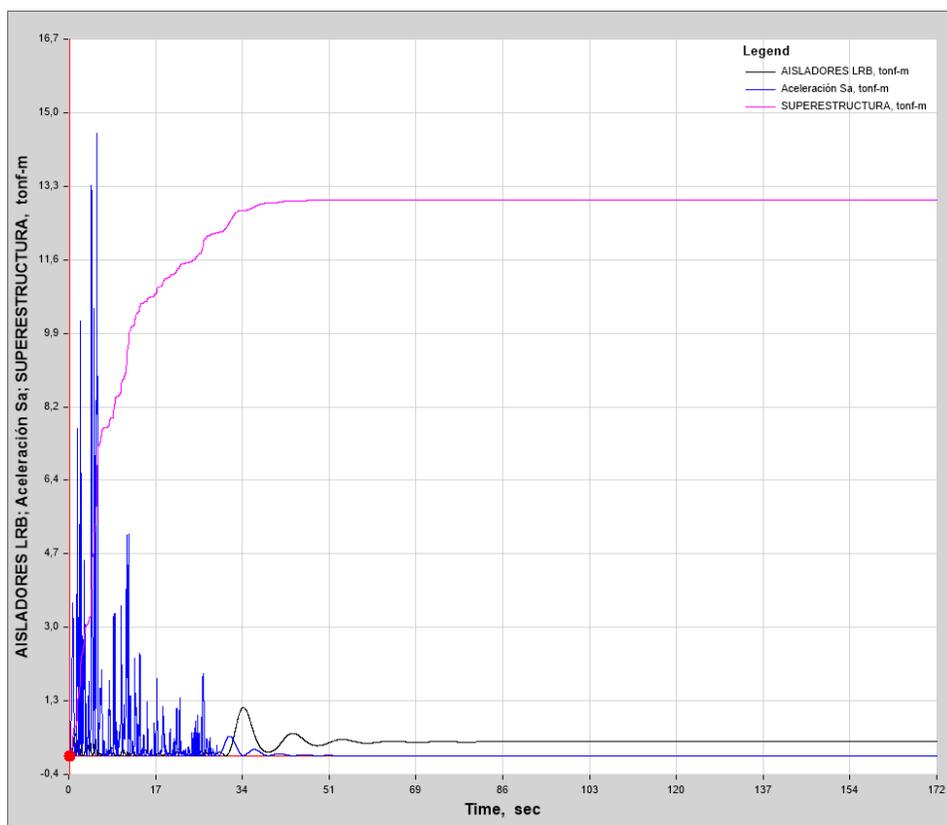


Figura 32. Gráfico de control de daño del aislador sísmico versus respuesta espectral

6.9 Comparativa: Estructura convencional – Estructura con aislación sísmica

A continuación, se presenta una comparativa detallada que aborda los criterios más importantes en términos de nivel de desempeño y seguridad estructural, sin perder de vista la viabilidad constructiva de un proyecto de esta envergadura. La evaluación considera factores esenciales, como la capacidad de resistencia sísmica y la capacidad de amortiguamiento para mitigar daños durante eventos sísmicos. Además, se analiza la influencia de la ubicación geográfica en el riesgo sísmico y la importancia del cumplimiento de normativas y códigos de construcción.

6.10 Fuerzas cortantes

- **Estructura convencional:** Se obtiene el cortante máximo en la base de la estructura de $V=117.59$ Toneladas.

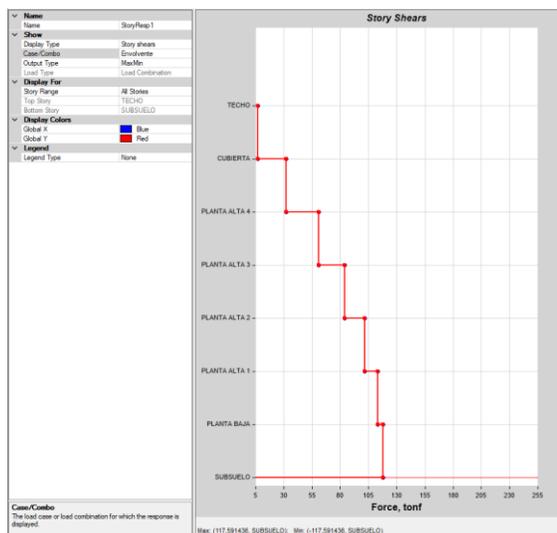


Figura 33. Cortante máxima en estructura convencional

- **Estructura con aislación sísmica:** Se obtiene el cortante máximo en la base de la estructura de $V=117.53$ Toneladas. Aplicada la absorción del sismo de aproximadamente 60% se tiene un cortante $V = 47.012$ Toneladas

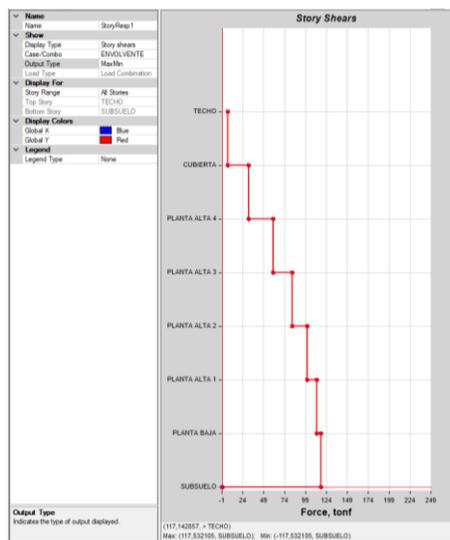


Figura 34. Cortante máximo en estructura con aislamiento sísmico

6.11 Respuesta sísmica

6.11.1 Períodos de vibración

- **Período fundamental de la estructura convencional:** Mediante el análisis modal, se obtuvo un período de 1.018 segundos.
- **Período fundamental de la estructura con aislamiento sísmico:** Mediante el análisis modal, se obtuvo un período de 2.873 segundos.

6.11.2 Derivas entrepiso

- **Deriva entrepiso máximo de la estructura convencional:** Las derivas máximas ocurren en la aplicación del sismo dinámico, y se obtuvo la deriva entrepiso máxima de 0.0015 m/m, es decir 0.15%

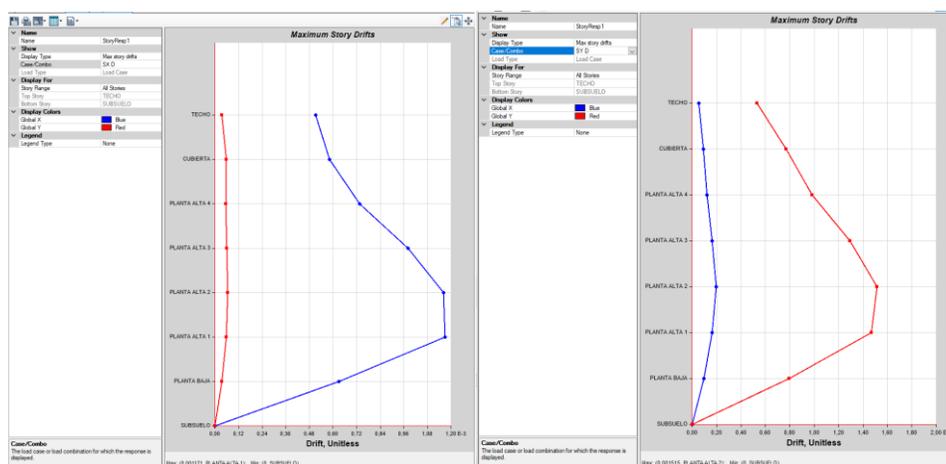


Figura 35. Deriva entrepiso máximo de la estructura convencional

- **Deriva entrepiso de la estructura con aislamiento sísmico:** Las derivas máximas ocurren en la aplicación del sismo dinámico, y se obtuvo la deriva entrepiso máxima de 0.000091 m/m, es decir 0.0091%

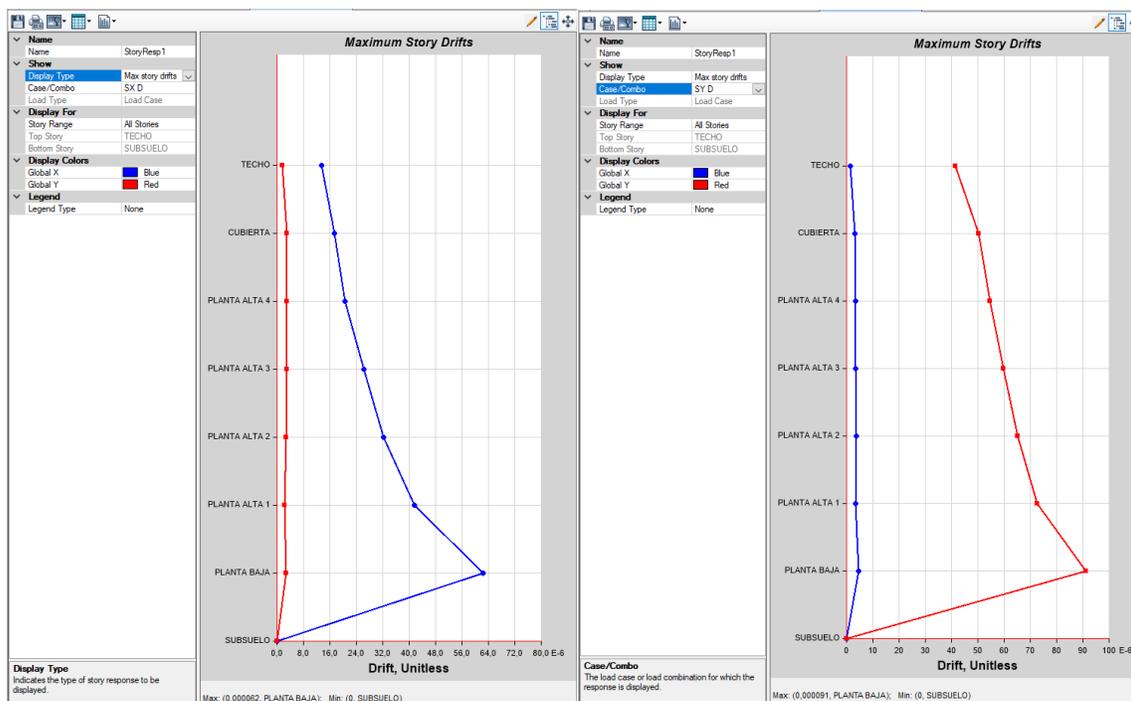


Figura 36. Deriva entrepiso máximo de la estructura con aislamiento sísmico

6.12 Control de daño

- Estructura convencional:** Si bien es cierto, en una estructura convencional se diseñan los elementos estructurales para soportar la carga lateral de un sismo, en nivel de desempeño se puede llegar al rango elástico del elemento, sin llegar al fallo. La estructura disipa la energía de un sismo absorbiéndola, sin embargo, la estructura si sufre un daño en sus elementos.
- Estructura con aislamiento sísmico:** El método de aislación sísmica permite definir el nivel de daño que esta dispuesto a filtrar en el momento de un sismo, sin embargo, no siempre es exacto. Esta absorción se logra mediante la fricción y el movimiento. Al tener una proyección cuantificable de la absorción del sismo, se puede estimar el nivel de daño producido en la estructura.

Para este caso, se ha determinado un nivel de daño no mayor al 40%, ya que se simuló un sismo severo estipulado por la Normativa NEC-SE-DS y se obtuvo una absorción del sismo de aproximadamente 60%.

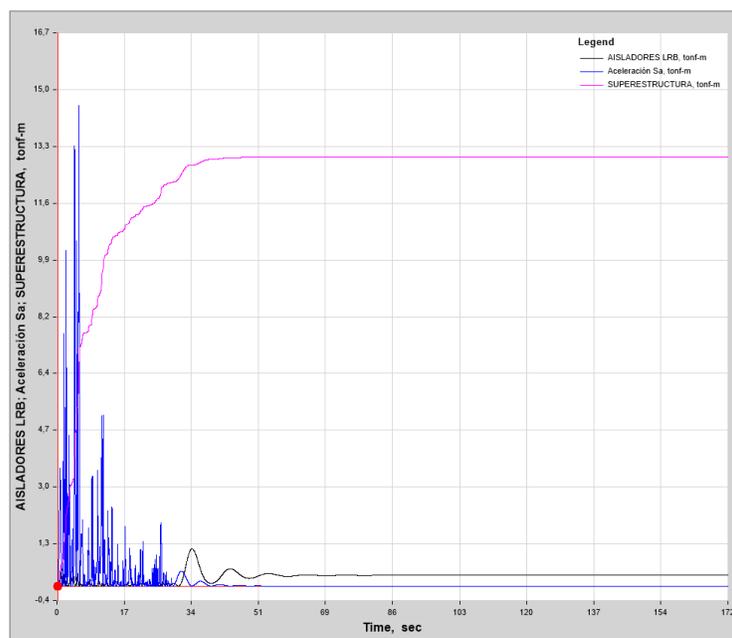


Figura 37. Gráfico de control de daño del aislador sísmico versus respuesta espectral

6.13 Viabilidad del uso de aislación sísmica con respecto a una estructura convencional

Es fundamental considerar diferentes aspectos al seleccionar el enfoque estructural más adecuado para un proyecto específico, evaluando las ventajas y desventajas en función de las necesidades, ubicación y características del entorno.

6.13.1 Ventajas de una estructura con aislación sísmica

- **Mayor seguridad sísmica:** radica en una mayor capacidad para resistir y disipar fuerzas sísmicas, proporcionando una mayor seguridad estructural durante eventos sísmicos.

- **Menores daños estructurales:** La capacidad de desplazamiento controlado ayuda a minimizar los daños estructurales, ya que absorbe y disipa la energía sísmica, reduciendo el riesgo de colapso.
- **Protección de contenidos y ocupantes:** La aislación sísmica contribuye a la protección de contenidos y ocupantes al reducir las aceleraciones transmitidas a la estructura, disminuyendo el riesgo de lesiones y daños a los bienes.
- **Menor transmisión de fuerzas sísmicas:** Se minimiza la transmisión de fuerzas sísmicas a la estructura, lo que puede ser beneficioso en zonas de alto riesgo sísmico.
- **Menor cortante basal:** Aunque puede haber un aumento en el cortante basal, en algunos casos, la aislación sísmica puede ayudar a reducir el cortante basal en comparación con una estructura convencional.

6.13.2 Desventajas de una estructura con aislación sísmica

- **Costos iniciales elevados:** La implementación de sistemas de aislación sísmica conlleva costos iniciales significativos en comparación con estructuras convencionales.
- **Requiere mantenimiento especializado:** Puede requerir mantenimiento especializado y monitoreo continuo para garantizar el rendimiento a lo largo del tiempo.
- **Complejidad en el diseño:** El diseño de estructuras con aislación sísmica puede ser más complejo y requerir un conocimiento técnico avanzado.
- **Mayor amortiguamiento:** Algunos sistemas de aislación sísmica pueden introducir mayor amortiguamiento, lo que puede afectar la respuesta dinámica y la rigidez de la estructura.

7. Conclusiones

Este proyecto ha alcanzado con éxito el diseño de dos tipos de estructuras, una convencional y otra con aislamiento sísmico, logrando cumplir de manera integral con las exigentes consideraciones normativas y rigurosos criterios de diseño establecidos. La capacidad de desarrollar ambas estructuras bajo estrictas normativas demuestra la aplicabilidad y eficacia de las metodologías empleadas, consolidando así la viabilidad de implementar soluciones innovadoras y avanzadas en ingeniería estructural.

En conclusión, los resultados obtenidos de este estudio subrayan la eficacia del aislamiento sísmico en comparación con las estructuras convencionales. Se observó una significativa reducción en las derivas de piso, con una disminución promedio del 83% en comparación con las estructuras no aisladas. Además, el empleo de aislamiento sísmico contribuyó a mejorar el amortiguamiento de las estructuras, demostrando una disminución del 60% en las vibraciones inducidas por eventos sísmicos. En cuanto al periodo de vibración de la estructura, se registró un notable aumento de 1.018 segundos en una estructura convencional, a un período de 2.873 segundos en una estructura aislada. Esta variación de períodos genera una disminución notable en la aceleración espectral máxima que afectaría a la estructural.

A pesar de estos beneficios, es importante señalar que la implementación de aislamiento sísmico conlleva un incremento en el presupuesto de construcción de un 3% a un 10%. No obstante, este costo adicional se ve justificado por la mejora significativa en la seguridad y la capacidad de recuperación ante eventos sísmicos, lo que sugiere que la inversión en aislamiento sísmico es una consideración fundamental para proyectos que buscan una mayor resistencia estructural y una mitigación efectiva de los efectos sísmicos.

La implementación del aislamiento sísmico destaca particularmente el compromiso con la mejora de la resiliencia ante eventos sísmicos. La capacidad de absorber y mitigar las fuerzas sísmicas, junto con la adaptabilidad a condiciones geotécnicas específicas, posiciona esta alternativa como una opción robusta para entornos sísmicos. Sin embargo, la implementación de aislamiento sísmico no se considera muy viable debido a la falta de un historial significativo de sismos altamente destructivos en la región. A lo largo del tiempo, la ciudad de Cuenca ha experimentado eventos sísmicos, pero estos han sido generalmente de baja intensidad y no han causado daños significativos a las estructuras existentes. Esta relativa ausencia de sismos devastadores ha llevado a que la adopción de medidas como el aislamiento sísmico no sea prioritaria en comparación con otras estrategias de construcción y reforzamiento estructural.

Asimismo, el diseño de la estructura convencional refleja un enfoque tradicional sólido y cumplidor de los requisitos normativos. Aunque puede no presentar las mismas características de desplazamiento controlado que la estructura con aislamiento sísmico, sigue siendo una opción viable y segura, respaldada por décadas de práctica convencional en ingeniería estructural. La toma de decisiones en materia de construcción en la ciudad de Cuenca se centra en enfoques que se adapten mejor a las condiciones específicas de la ciudad y que respondan a las necesidades presentes, sin comprometer la seguridad de las edificaciones.

Ambas soluciones estructurales, en su conjunto, contribuyen al enriquecimiento del conocimiento en ingeniería sísmica y ofrecen opciones versátiles para diseñadores y profesionales del sector. Este estudio subraya la importancia de considerar diversas metodologías en el diseño de estructuras, con el objetivo final de fortalecer la resiliencia y seguridad de las edificaciones en entornos propensos a eventos sísmicos.

Para una revisión más detallada, se incluyen los documentos y datos relevantes en los anexos adjuntos a este informe. Estos anexos no solo respaldan las conclusiones presentadas, sino que también proporcionan una base sólida para futuras investigaciones y desarrollos en el campo de la ingeniería sísmica.

8. Recomendaciones

Para futuras investigaciones, se sugiere enfocar esfuerzos en diversas áreas que puedan contribuir al avance y perfeccionamiento de las estructuras con aislamiento sísmico. En primer lugar, se recomienda explorar en profundidad estrategias de diseño de cimentaciones que optimicen aún más la eficacia del aislamiento sísmico, considerando las características

específicas del suelo y las condiciones geotécnicas locales con un estudio de suelos que fundamente el diseño.

Además, se podría abordar investigaciones centradas en el rediseño de elementos estructurales, teniendo en cuenta el control de daño en una estructura con aislación sísmica para desarrollar enfoques más personalizados y eficientes. Estudiar cómo la implementación de aislamiento sísmico afecta las cargas y los esfuerzos en elementos clave de la estructura permitiría una mejor comprensión de la respuesta sísmica y llevaría a ajustes más precisos en el diseño.

Finalmente, se sugiere llevar a cabo investigaciones específicas sobre análisis presupuestarios que proporcionen estimaciones más precisas de los costos asociados con la implementación del aislamiento sísmico. Este enfoque permitiría a los profesionales de la construcción y a los planificadores tomar decisiones informadas sobre la viabilidad económica de estas medidas de seguridad, equilibrando eficazmente la inversión con los beneficios obtenidos en términos de resistencia estructural y resiliencia ante eventos sísmicos.

9. Referencias bibliográficas

Genatios, C., & Lafuente, M. (2016). *Introducción al uso de aisladores y disipadores en estructuras* (Carlos Genatios). Banco de Desarrollo de América Latina.
<http://scioteca.caf.com/handle/123456789/1213>

- Jiménez-Pacheco, J., Cabrera Cajamarca, J., Sanchez Beltrán, J., & Avilés Tenorio, F. (2018). Vulnerabilidad sísmica del patrimonio edificado del Centro Histórico de la Ciudad de Cuenca: Lineamientos generales y avances del proyecto. *maskana*, 9(1,59-78, 2018), 20. <https://doi.org/10.18537/mskn.09.01.07>
- Jiménez-Pacheco, J., Quezada, R., Calderón-Brito, J., Ortega-Guamán, E., & García, H. (2022). Characterisation of the built heritage of historic centres oriented to the assessment of its seismic vulnerability: The case of Cuenca, Ecuador. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 71, 102784. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2022.102784>
- Lema, E. (2013). *Análisis y diseño de un edificio con aisladores sísmicos modelamiento en el ETABS*. Universidad Central del Ecuador.
- NEC Normativa de construcción Sismo Resistente, NEC-SE-DS (2015).
- Perles, P., & Lafuente, M. (2009). *Hormigón Armado* (Vol. 1). nobuko.
- Radkia, S., Rahnavard, R., Tuwair, H., Abbas Gandomkar, F., & Napolitano, R. (2020). Investigating the effects of seismic isolators on steel asymmetric structures considering soil-structure interaction. *Structures*, 27, 1029-1040. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.07.019>
- UNESCO. (2000). *Convention concerning the protection of the world cultural and natural heritage* (p. 115) [Report]. United Nations Educational Scientific and Cultural Organization. <https://whc.unesco.org/archive/repcom99.htm#863>
- Zambrano Mejía, A., Frau, C. D., & Vielma, J. C. (2023). *Análisis no lineal de sismos destructivos. Terremoto de Ecuador del 16 de abril de 2016*. 28(17-34), 33.

Andrade, H. R. (2014). *ESTRUCTURAS I APUNTES DE CLASES*. Universidad de Cuenca.

Darwin, A. N. D. (2001). *DISEÑO DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO*. McGraw-Hill.

De Borja Varona Moya José Antonio López Juárez Luis Bañón Blázquez, F. (2013). *APUNTES DE HORMIGÓN ARMADO*. Escuela Politécnica Superior Universidad de Alicante.

Mesenguer, Á. G. (2011). *HORMIGÓN ARMADO III Elementos estructurales*. Fundación Escuela de la Edificación Maestro Victoria.

10. Anexos