

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO

CARRERA:
INGENIERÍA MECÁNICA

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de:
INGENIEROS MECÁNICOS

TEMA:
DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN AISLADOR SÍSMICO DE ELASTÓMERO
PARA EDIFICIOS EN ESTRUCTURA METÁLICA DE HASTA 4 PISOS

AUTORES:
ISAAC NAHIN CASIERRA PRADO
MARY LUCIA PILLAJO ROMERO

TUTOR:
WILLIAM GUSTAVO DÍAZ DÁVILA

Quito, agosto del 2021

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTORES

Nosotros, Isaac Nahin Casierra Prado con Cédula de Identidad N°0850181827 y Mary Lucia Pillajo Romero con Cédula de Identidad N°1719083832, ponemos de manifiesto nuestra voluntad para que la Universidad Politécnica Salesiana obtenga la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del trabajo de titulación: DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN AISLADOR SÍSMICO DE ELASTÓMERO PARA EDIFICIOS EN ESTRUCTURA METÁLICA DE HASTA 4 PISOS, mismo que ha sido desarrollado para la obtención del título de Ingenieros Mecánicos, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos ya mencionados.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en nuestra condición de autores nos reservamos los derechos morales de la obra ya mencionada. En concordancia suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.



Isaac Nahin Casierra Prado
C.I. 0850181827



Mary Lucia Pillajo Romero
C.I. 1719083832

Quito, agosto de 2021

DECLARACIÓN DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR

Yo declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el Artículo Académico, DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN AISLADOR SÍSMICO DE ELASTÓMERO PARA EDIFICIOS EN ESTRUCTURA METÁLICA DE HASTA 4 PISOS, realizado por Isaac Nahin Casierra Prado y May Lucia Pillajo Romero, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana, para ser considerado como trabajo final de titulación.

Quito, agosto del 2021



William Gustavo Díaz Dávila

C.I. 0400926184

DEDICATORIA

El presente proyecto lo dedico a mis padres, especialmente, a mi madre Solange Prado Bravo quien estuvo apoyándome, incondicionalmente, dándome aliento para afrontar cualquier adversidad; también a la comunidad salesiana que me dio la oportunidad de estudiar en esta prestigiosa universidad.

Isaac

Este proyecto se lo dedico a mi madre Blanquita Romero por su apoyo fundamental que me brindó durante toda mi carrera universitaria para cerrar esta etapa de mi vida, ahora entiendo todo el sacrificio que ella hizo por mí y que en este momento ha dado frutos.

Mary

AGRADECIMIENTO

Agradecemos a la Universidad Politécnica Salesiana, a todos sus docentes que en sus aulas han compartido su sabiduría y consejos para formarnos como buenos ingenieros, y, más que nada como unas excelentes personas.

A nuestro tutor, el Ingeniero William Díaz quien, con su ayuda y excelente dirección, fue un gran aporte para el rápido desarrollo de este proyecto.

A nuestros compañeros de clase con los cuales compartimos alegrías y tristezas dentro de nuestra vida universitaria y que ahora se encuentran al igual que nosotros compartiendo este momento tan especial.

Isaac y Mary

DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN AISLADOR SÍSMICO DE ELASTÓMERO PARA EDIFICIOS EN ESTRUCTURA METÁLICA DE HASTA 4 PISOS

DESIGN AND SIMULATION OF AN ELASTOMER SEISMIC ISOLATOR FOR BUILDINGS IN METAL STRUCTURE OF UP TO 4 FLOORS

Isaac Casierra-Prado^{1,*}, Mary Pillajo-Romero²

Resumen

La presente investigación tiene como objetivo el análisis numérico de un aislador sísmico HDLRB con cuatro núcleos de plomo para determinar las ventajas que presentaría un edificio con este sistema de aislamiento. El aislador se sometió a cizallamiento-compresión determinando la aparición de fisuras entre la unión del elastómero y las placas de acero cuando este es sometido a un desplazamiento de 128 mm, también se obtuvieron valores de rigidez efectiva de 290072 kg/m, amortiguamiento efectivo del 17.5% y límite de fluencia de 11670 kg/m.

En el estudio de la estructura se eligió las derivas de piso y aceleraciones máximas como factores a analizar. Respecto a las derivas entrepiso, se obtuvo un valor máximo de 40.4 mm para el edificio sin aislamiento y 3.57 mm para el edificio con aislador sísmico, presentando este último un desplazamiento en base máximo de 116.1 mm. La estructura aislada sísmicamente presentó valores de aceleración máxima de piso entre 0.094 y 0.162 m/s², llegando a reducir desde 2.6 hasta 18.6 veces la aceleración observada en la edificación sin aislar donde se identificaron valores entre 0.245 y 3.02 m/s².

Palabras Clave: Aislamiento sísmico de base, Elastómero de alto amortiguamiento, Edificación metálica, Modelo hiperelástico de Ogden

Abstract

The objective of this research is the numerical analysis of an HDLRB seismic isolator with four lead cores to determine the advantages that a building with this isolation system would present. The insulator was subjected to shear-compression determining the appearance of cracks between the elastomer union and the steel plates when it is subjected to a displacement of 128 mm, effective stiffness values of 290072 kg / m were also obtained, effective damping of the 17.5% and yield point of 11670 kg / m.

In the study of the structure, the floor drifts and maximum accelerations were chosen as factors to be analyzed. Regarding the mezzanine drifts, a maximum value of 40.4 mm was obtained for the building without insulation and 3.57 mm for the building with seismic isolator, the latter presenting a maximum base displacement of 116.1 mm. The seismically isolated structure presented maximum floor acceleration values between 0.094 and 0.162 m / s², reducing the acceleration observed in the uninsulated building from 2.6 to 18.6 times, where values between 0.245 and 3.02 m / s² were identified.

Keywords: Seismic base isolation, High damping elastomer, Metal building, Ogden's hyperelastic model.

1. Introducción

Los terremotos han sido protagonistas de diversos desastres naturales para la vida en general desde la antigüedad y hasta la actualidad, estas diversas situaciones han llevado a la humanidad a sufrir consecuencias muy devastadoras, así como pérdidas irremediables e incalculables. Los movimientos sísmicos ocasionados por la constante actividad de las placas tectónicas de la Tierra han sido capaces de generar pérdidas humanas hasta inhabilitar temporalmente el uso de edificaciones, reduciendo la vida útil de la edificación y finalmente su colapso [1] [2].

Los terremotos se presentan especialmente en ubicaciones geográficas de países que están en zonas de alta actividad sísmica, siendo los más afectados los que se encuentran en vías de desarrollo; por tal motivo, rara vez se implementan buenos mecanismos de protección sísmica [3]. Al tratar con eventos naturales imposibles de predecir, se torna muy difícil evitar el daño que dejan estos; en consecuencia; se vuelve necesaria la aplicación del conocimiento de los constructores y diseñadores, que están llamados a mitigar los efectos que puedan causar estos terremotos a gran escala y hallar la forma de mejorar la ductilidad de la estructura, introduciendo mecanismos de disipación; o, a su vez, disminuyendo la demanda sísmica con la aplicación de sistemas de aislamiento basal [4].

Tomando al Ecuador como escenario principal, se evidencia que, en la última década se han presentado algunos eventos sísmicos importantes como, el de Riobamba (agosto del 2010, magnitud 7.1), el de Quito (abril 2014, magnitud 5.1) o el terremoto de Pedernales (abril del 2016, magnitud 7.8) siendo hasta ahora el más destructivo, con más de 650 pérdidas humanas y 17000 heridos; pese a esto, pocas son las edificaciones que en la actualidad cuentan con un sistema de aislamiento sísmico.

Por otro lado, el uso de los aisladores de tipo elastómero ha ido incrementado significativamente en los últimos años, debido a que su aplicación se extiende tanto para construcciones de gran importancia como hospitales, edificios de

protección civil, casas patrimoniales, hasta estructuras de uso común [5]. El aislamiento en la base de una estructura es una de las tecnologías más efectivas para la protección sísmica, debido a que es posible provocar un cambio al periodo de vibración de una edificación en un rango donde la aceleración espectral es baja [6] [7]. Un aislador sísmico tipo elastómero es un dispositivo relativamente económico que es capaz de aislar la transmisión de energía que va de los cimientos hacia la edificación [6] [8]. Además, estos aisladores se diseñan para adaptarse a los movimientos de la estructura, desplazamientos dinámicos como los presentados en un sismo o estáticos ocasionados por la dilatación térmica. [3]

Un aislador sísmico tipo elastómero está compuesto por varias láminas intercaladas de caucho y acero, las cuales en conjunto se las ubica entre dos placas gruesas de acero, que generalmente cuentan con núcleos de plomo o acero. Las placas gruesas de acero que contienen al conjunto de láminas intercaladas tienen como fin conectar a la edificación que es todo lo que está por encima del amortiguador que va en la base de la edificación [9]. Las placas de acero que van intercaladas con el caucho ayudan a reducir el abultamiento lateral de la goma mientras permiten al elastómero deformarse lateralmente [10]. La rigidez de las placas de acero frente a cargas verticales de compresión es relativamente alta, debido a que deben soportar el peso de la estructura, mientras que la rigidez lateral a cortante es baja con el fin de absorber las cargas sísmicas mediante deformaciones en el aislador [11] [12].

En los aisladores tipo elastómeros se pueden aplicar diferentes materiales y refuerzos, como el caucho de alta o baja amortiguación, intercalado con planchas de acero o fibra y reforzado con núcleos de caucho, acero o plomo, cada uno con sus propias ventajas y desventajas [13] [14].

El beneficio de usar aisladores elastoméricos y otros dispositivos de protección sísmica está bien documentado [8]. Radkia et al. [15] estudian el efecto de tres tipos de aisladores sísmicos en edificaciones de acero asimétricas. Los resultados determinaron que, para estructuras mayores a un

piso, las irregularidades geométricas no afectaron significativamente en la respuesta dinámica de esta.

Etedali et al. [16], observaron que, cada tipo de aislador tiene ventajas específicas dependiendo de la cantidad de pisos de la estructura. En términos de reducción del desplazamiento del piso y la aceleración Los aisladores LRB se desempeñaron mejor que los PF y R-FBI en estructuras con 5 pisos o similares.

Rahnavard et al. [2] y Craveiro et al. [12] analizan el comportamiento de los aisladores sísmicos con uno y varios núcleos de caucho mediante análisis de historial de tiempo estático, cíclico y dinámico. Sus resultados sugieren que los aisladores de base con múltiples núcleos de caucho distribuidos radialmente superan a los que tienen un solo núcleo de caucho central debido a que no alteran la estabilidad del aislador cuando este se somete a grandes cargas. Altalabani et al. [17] realizaron un análisis similar reemplazando los múltiples núcleos de caucho por plomo, concluyendo que, el comportamiento del aislador no depende significativamente de su forma sino del número de núcleos. El aislador con 4 núcleos es el más estable.

Respecto a la determinación de las propiedades mecánicas del aislador se han realizado diversas investigaciones numéricas y experimentales donde se somete a el dispositivo a cargas de compresión y deformaciones cortantes. Xiang [18] se percató que el deslizamiento de los cojinetes durante un terremoto puede ocasionar desplazamiento excesivo y deterioro en una estructura, para mitigar estos daños, realizó un estudio de mesa vibratoria donde se permitió el desplazamiento de aisladores con caucho laminado. Kalfas et al. [11] investigaron la respuesta de cojinetes laminados en acero sometidos a cargas axiales variables y desarrollo de tensiones locales. En su investigación se comprobó que la rigidez del aislador se ve significativamente afectada bajo cargas de compresión, también determinó que al combinar deformación cortante, rotación y desplazamiento axial, el aislador se comporta de manera fluctuante. Gauron [19] realizó un estudio paramétrico para evaluar la estabilidad lateral y los estados límite de falla por corte de los cojinetes de caucho de puentes

comparando experimentalmente mediante pruebas de cizallamiento y compresión 24 cojinetes.

Los estudios antes mencionados se centraron en analizar el comportamiento del elastómero bajo cargas de compresión y cizallamiento, los resultados de estas investigaciones demuestran que los aisladores de elastómeros presentan daños internos antes de fallar, sin necesidad de mostrar degradación a simple vista. Por este motivo es necesario realizar el análisis numérico de los aisladores para determinar posibles fallas internas en caso de un sismo.

Este estudio tiene el objetivo de caracterizar el comportamiento del aislador mediante un análisis numérico, sometiéndolo a cargas de: compresión, corte y excitación sísmica bidireccional simultáneamente, para determinar propiedades mecánicas como: el límite de fluencia, la rigidez y el amortiguamiento efectivo. Se utilizará un aislador elastomérico de caucho de alta amortiguación reforzado con cuatro núcleos de plomo (HDLRB, por sus siglas en inglés) basándose en materiales y tecnología actualmente disponible en Ecuador. Para la evaluación del aislador se utilizó el modelo hiperelástico de Ogden para materiales elastoméricos incompresibles mediante simulación numérica utilizando SolidWorks Simulation. Finalmente, se evaluará el aislador comparando su desempeño en una estructura metálica de 4 niveles con y sin aislador modelada en SAP2000.

2. Metodología

2.1. Descripción del caso de estudio

En el presente trabajo se utilizó el análisis por elementos finitos (AEF), para el estudio de las propiedades de un aislador sísmico y el efecto de este en una edificación metálica mediante el uso del software SolidWorks y SAP2000 [20] [21]. Primero se diseñó una edificación metálica de 4 pisos sometida a una combinación de cargas vivas, muertas y sísmicas de acuerdo con lo estipulado en la normativa NEC-SE-DS [22]. El diseño del aislador se realizó considerando las reacciones máximas en los cimientos de la estructura y las propiedades de los materiales que componen a

la edificación se compone de 24 soportes para columnas donde, en el caso de la edificación aislada, se coloca la misma cantidad de aisladores sísmicos HDLRB, Se utiliza losas de concreto con plancha colaborante de 15 cm de espesor, soportado por vigas secundarias de perfil laminado en caliente W8x10 que a su vez transmiten la carga a las vigas principales W10x12. En los vanos medios se colocaron tubos de 5x1/4 como riostras para dar estabilidad y reducir el valor de las derivas. Se optó por utilizar 2 tipos de columnas, una de perfil TS8x8x1/4 para la última planta y columnas tipo TS10x10x1/4 para el resto de la edificación, siendo el acero ASTM572 Gr50 el material escogido en todos los perfiles. Las dimensiones generales de la edificación se pueden apreciar en la Figura 2.

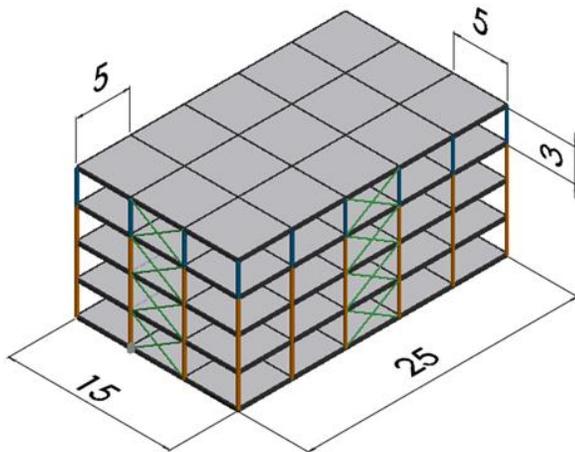


Figura 2. Dimensiones generales de la edificación

Para la simulación del edificio se aplicarán tres tipos de cargas de manera similar a la investigación realizada por Pauletta [27], estas cargas serán vivas, muertas y sísmicas. Para determinar la carga muerta se consideró como principales factores el peso de la losa, mampostería y componentes de acabados tal como se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1: Cargas muertas aplicadas a la estructura

Cuadro de cargas	Cargas muertas por Nivel (kg/m ²)				
	1 ^{er} Nivel (0m)	2 ^{do} Nivel (3 m)	3 ^{er} Nivel (6 m)	4 ^{to} Nivel (9 m)	Cubierta (12 m)
Losa	300	300	300	300	150
Mampostería	80	80	80	80	0
Acabados	20	20	20	20	0

Para la definición de cargas vivas se consideraron los valores establecidos por la NEC-SE-CG donde se recomiendan cargas alrededor de 400 kg/m² para pasillos y salas de espera con gran concurrencia de pacientes, 200 kg/m² para salas de pacientes y 300 kg/m² para quirófanos y laboratorios, optándose por distribuir la carga viva tal como se presenta en la Tabla 2.

Tabla 2: Cargas vivas aplicadas a la estructura

Ocupación o Uso	Cargas vivas por nivel (kg/m ²)				
	1 ^{er} Nivel (0 m)	2 ^{do} Nivel (3 m)	3 ^{er} Nivel (6 m)	4 ^{to} Nivel (9 m)	Cubierta (12 m)
Pisos	500	500	500	500	0
cubiertas	0	0	0	0	150

Las cargas sísmicas serán aplicadas mediante un espectro de aceleración bidimensional para un sismo máximo considerado (MCE, por sus siglas en inglés) con una probabilidad de excedencia en 50 años del 2% tomando en cuenta parámetros de zona sísmica, geología local, irregularidades y categoría del edificio como lo estipula la NEC-SE-DS [22]. La Figura 3 presenta el espectro de aceleración para un suelo tipo C y una edificación con factor de importancia esencial de 1.5 sin irregularidades de planta.

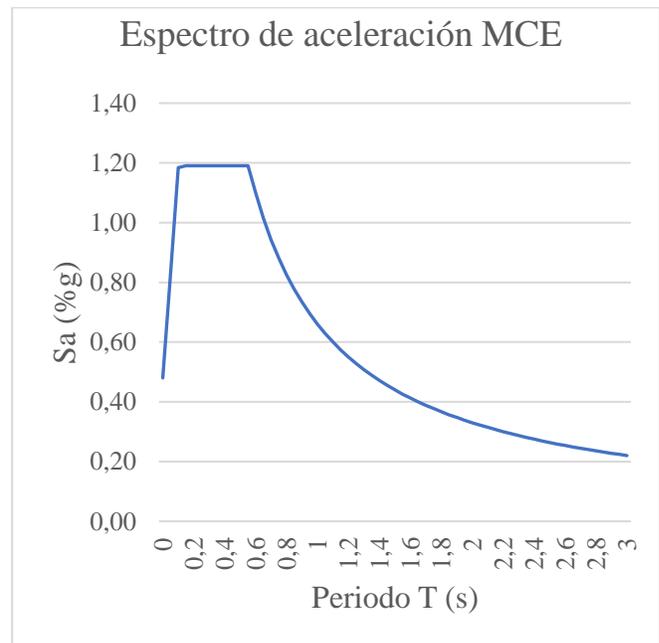


Figura 3. Espectro de aceleración para sismo máximo y sismo de diseño

Tabla 4: Propiedades mecánicas de los materiales utilizados en el aislador

	Módulo elástico	Módulo cortante	Módulo Poisson	Límite elástico	Límite de tracción
	E (MPa)	G (MPa)	ν	F_y (MPa)	F_c (MPa)
Concreto	24855	10356	0.30	-----	-----
Acero ASTM A572 Gr50	200000	79300	0.26	345	448
Elastómero shore 70	7.35	1.73	0.40	8.28	13.80

2.4. Dimensiones y propiedades del aislador

Las dimensiones del aislador se calcularon en base al peso de la estructura, tipo de suelo y un coeficiente de amortiguamiento de diseño del 20%. Para una carga vertical máxima de 120000 kg, considerando las propiedades del material, se recomienda el uso de un aislador sísmico con un diámetro de elastómero de 460 mm. Las placas de acero encargadas de unir el elastómero con la estructura poseen con una dimensión de 535 mm x 535 mm x 25.4 mm con ocho agujeros de una pulgada para pernos de anclaje. La altura total del aislador influye directamente en el amortiguamiento efectivo de este, su valor es de 340 mm como se presenta en la Figura 4.

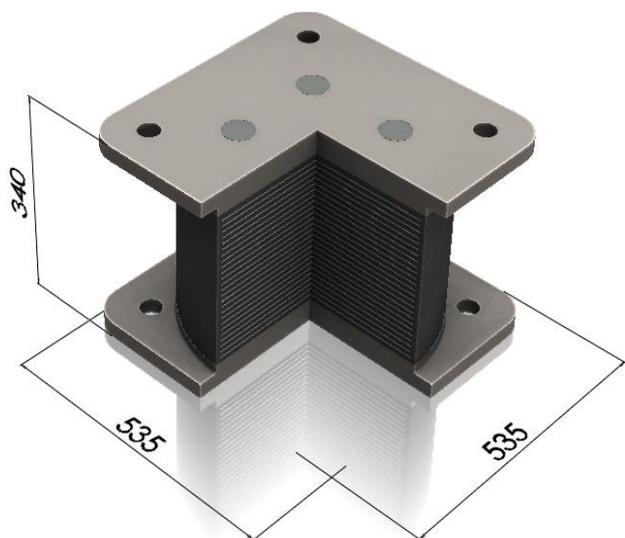


Figura 4. Dimensiones del aislador sísmico de elastómero

El cuerpo de elastómero es cilíndrico con una altura de 260 mm repartida entre láminas de acero ASTM Gr50 de 2mm intercaladas con láminas de elastómero de alto amortiguamiento con dureza shore70 de 8 mm. Al optarse por utilizar cuatro núcleos de plomo en vez de uno, el área circular recomendada de 11000 mm² deberá

repartirse entre estos cuatro, por lo que cada núcleo tendrá un diámetro de 60 mm. En la Tabla 3 se resumen las dimensiones del aislador.

Tabla 3: Dimensiones específicas del aislador sísmico

Parámetro	Dimensión
Espesor del elastómero	8 mm
Espesor de las capas de acero	2 mm
Diámetro de las capas	460 mm
Diámetro del núcleo de Plomo	60 mm
Altura del elastómero	260 mm
Altura total del aislador (h)	340 mm
Longitud Total	535 mm
Ancho total	535 mm
Relación de aspecto b/h	1.35
Número de capas de elastómero	26
Número de capas de acero	25
Número de núcleos de plomo	4

2.5. Propiedades de los materiales

En SolidWorks, las propiedades mecánicas de los elastómeros están definidas por teorías hiperelásticas. Para este estudio, se utiliza el método de grandes deformaciones con el modelo hiperelástico de Ogden caracterizado por estimar con precisión el comportamiento de materiales elastoméricos [2] y disponible en SolidWorks. Como se mencionó antes, se utilizará acero ASTM A572 Gr50, tanto para el diseño del edificio como del aislador. Con este material se precisa únicamente de parámetros de endurecimiento cinemático lineal, ya que trabajos anteriores [2] han demostrado que las capas de calzas de acero no entran en la región no lineal. Las capas de elastómero estarán compuestas por una combinación de caucho natural y neopreno de dureza shore70 con un límite de ruptura de 17.2 MPa, cuyas propiedades fueron estudiadas por Aguilar et al. [28] y Abedi et al. [29], estas pueden encontrarse a detalle en la Tabla 4.

2.6. Mallado

Para analizar correctamente las propiedades del aislador y sus esfuerzos internos, es necesario trabajar con una malla que facilite la eficiencia del proceso, Para mallar un componente se puede utilizar elementos de tipo tetraédrico o hexaédrico, que dividen al componente en subconjuntos más pequeños. En esta malla se optó por utilizar elementos tetraédricos con una distribución heterogénea, obteniendo elementos con una dimensión máxima de 15 mm y mínima de 3 mm para las delgadas planchas de acero y en las zonas concentradoras de esfuerzo como se muestra en la Figura 5.

Se utilizó un tipo de mallado conocido como “mallado basada en curvatura” el cual se compone principalmente por elementos de segundo orden. Para reducir el valor de desviación en los resultados se aplicó técnicas de control del mallado, particularmente un sizing en las delgadas planchas de acero y caucho.

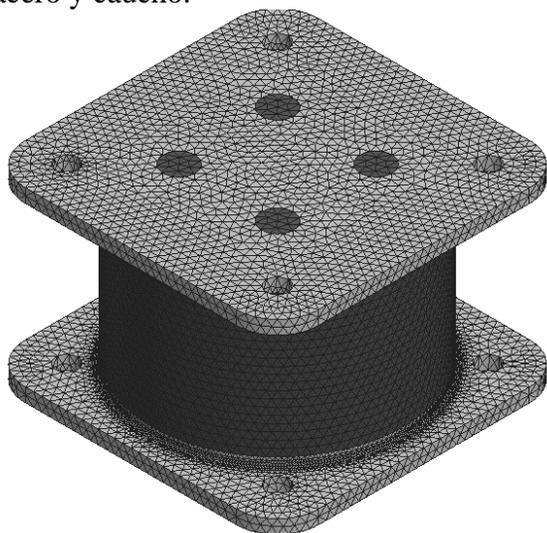


Figura 5. Mallado del aislador sísmico elastomérico

Para garantizar una alta fiabilidad en los resultados es necesario la obtención de un mallado eficiente, compuesto por un número adecuado de nodos y elementos. Para esto se realizó múltiples mallados con distintas técnicas y calidades. En la Tabla 5 se presentan parámetros de los diferentes mallados, optándose por escoger la cuarta malla gracias a su equilibrio entre calidad y número de elementos.

Tabla 5: Diferentes mallados del aislador sísmico.

Malla	Nº de Elementos	% Elementos aspecto ratio
1	63883	23,9
2	117163	42,5
3	214423	64,6
4	353889	65
5	712091	70,6

Parte de la verificación del mallado se encuentra en la comparación de resultados, debiendo presentarse un alto grado de similitud para garantizar una convergencia de valores. Para este caso se han escogido los valores de tensión máxima del elastómero para un desplazamiento de 128 mm como referencia.

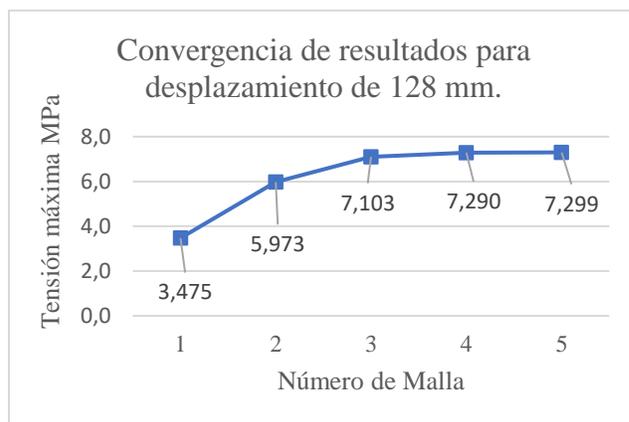


Figura 6. Convergencia de resultados para un desplazamiento de 128 mm.

En SolidWorks se dispone de numerosos tipos de materiales hiperelásticos, cada uno con diferentes formas de describir la función de energía. En este estudio se utiliza el modelo de la energía de deformación de Ogden para materiales hiperelásticos [30], caracterizado por modelar el caucho con precisión para grandes valores de deformación de materiales elastoméricos como el caucho y el neopreno. Este viene expresado por Ec6

$$W = \sum_{i=1}^N \frac{2 \cdot \mu_i}{\alpha_i^2} (\bar{\lambda}_1^{\alpha_i} + \bar{\lambda}_2^{\alpha_i} + \bar{\lambda}_1^{\alpha_i} - 3) + \sum_{i=l}^N \frac{1}{D_i} (J_{el} - l)^{2i} \quad (6)$$

Donde λ_i representa el tramo principal de desviación y μ_i, α_i son propiedades del material dependientes de la temperatura.

3. Resultados y Discusión

Para estudiar la respuesta sísmica de los edificios aislados, primero es necesario realizar el análisis del aislador sísmico mediante los esfuerzos internos presentados para determinar el límite de fluencia, el amortiguamiento y la rigidez efectiva. Los valores últimos de la deformación total de los aisladores corresponden a valores superiores al desplazamiento lateral máximo de diseño siendo este de 128 mm. Los aisladores fueron diseñados para soportar las cargas de corte y compresión presentadas. Se realizó el análisis numérico del aislador con una fuerza de compresión de 120000 kg para 4 casos de desplazamiento lateral, siendo estos de 32, 64, 96 y 128 mm.

3.1. Tensiones internas del aislador sísmico

Al observar el aislador, desde la parte exterior, es difícil apreciar cambios significativos debido a que

el comportamiento de las tensiones en esta zona es poco variable y con valores muy bajos. Para apreciar los valores máximos de tensión es necesario representarlos en una vista seccionada como la presentada en la Figura 7.

En la Figura 7a se presenta el aislador con un desplazamiento de 32 mm donde se observa tensiones de bajo valor, la mayoría de estas producidas por el peso propio y demás componentes de la estructura. Para las placas exteriores de acero de 25 mm se presentan tensiones máximas de 3.58 MPa, siendo estas menores que las observadas en las planchas interiores de acero de 2 mm con valores de 80 MPa y finalmente para el elastómero tensiones de 1.8 MPa.

En la Figura 7b el aislador tiene un desplazamiento de 64 mm; es decir, el 50% del desplazamiento máximo que se podría presentar en

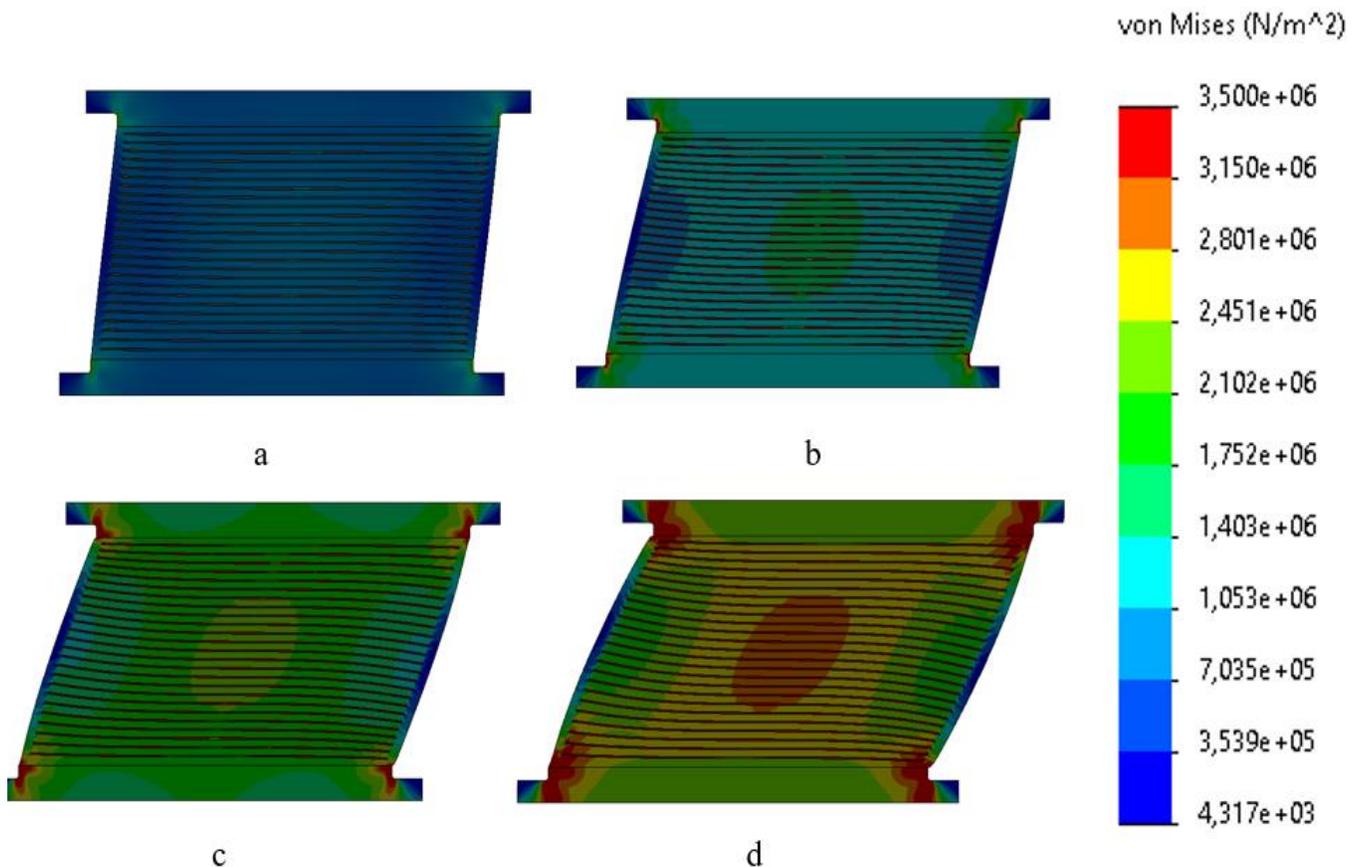


Figura 7. Tensiones Von Mises para diferentes desplazamientos. a)32mm, b)64mm, c)96mm, d)128mm

el caso de un sismo MCE, aquí se nota una pequeña concentración de esfuerzos en la unión del elastómero con las placas interiores de acero, siendo en estas últimas donde se presenta un valor máximo de 160.3 MPa; sin embargo, este es 2 veces menor al límite de fluencia del acero ASTM A572 Gr50 por lo que no se presenta daño alguno al aislador. Para las placas exteriores de acero y el elastómero se presentan tensiones de 7.1 MPa, y 3.65 MPa respectivamente.

Para la Figura 7c la concentración de esfuerzo en la unión elastómero acero se vuelve notoria, en este caso el desplazamiento aplicado es de 96 mm. donde el aislador comienza a presentar valores máximos de 5.47 MPa para el elastómero y 241 MPa para las placas internas de acero. Las placas externas de acero presentan tensiones de 10.74 MPa en este punto es fácil identificar que las tensiones en esta placa están muy por debajo de su límite de fluencia, esto debido al gran espesor de 25 mm. En la parte central del elastómero se aprecia concentración de esfuerzos, este es un comportamiento característico en este tipo de aisladores y; por lo general, mientras no sobrepasen el límite de fluencia no representan ningún peligro. En este caso, ya se vuelve notorio el redondeamiento en las paredes exteriores del aislador causado por la combinación de cargas.

Los aisladores sísmicos en pocas ocasiones llegan a deformarse hasta su desplazamiento máximo de diseño, sin embargo, es necesario determinar si bajo estas condiciones se presentan daños o fisuras. En la Figura 7d el aislador se somete a un desplazamiento de 128 mm, aquí se puede apreciar concentración de esfuerzos en la parte central con valores de 2.878 MPa, representando estos el 34% de la carga máxima que soportaría el elastómero; no obstante, en la unión elastómero acero aparecen esfuerzos con valores de 7.29 MPa. El factor de seguridad crítico en este caso es presentado por las planchas de acero, teniendo este un valor promedio de 3.2 y un mínimo de 1.2 En las placas exteriores de acero los esfuerzos estuvieron muy por debajo del límite de fluencia, motivo por el cual estos valores carecen de riesgo y por ende de relevancia en el estudio

3.2. Derivas del edificio sin aislador

Una vez analizada las propiedades del aislador sísmico se puede obtener su rigidez y amortiguamiento efectivo para realizar el estudio del edificio aislado sísmicamente.

Se utilizaron tres casos de carga sísmica donde la frecuencia se adaptó para que involucre más del 90% de la masa de la estructura como lo estipula la NEC-SE-DS [22], generando un mayor desplazamiento en el sentido Y en el caso del sismo 1, en el sentido X para el sismo 2 y rotacional alrededor del eje vertical del centro de masa para el sismo 3. Para una representación concisa de los resultados se promediaron los valores obtenidos en los diferentes nodos de cada piso considerando como respuestas sísmicas de análisis las derivas y aceleraciones de planta.

La deriva total y deriva entrepiso es un dato utilizado para el cálculo de las pérdidas económicas en la estructura, lo importante es que el edificio se comporte de una manera elástica, para ello las derivas entre piso no deberán ser mayores al 1.5% de la altura de estos, al sobrepasar ese valor se presentarían daños estructurales que pueden ir desde simples fisuras, hasta el colapso de la estructura.

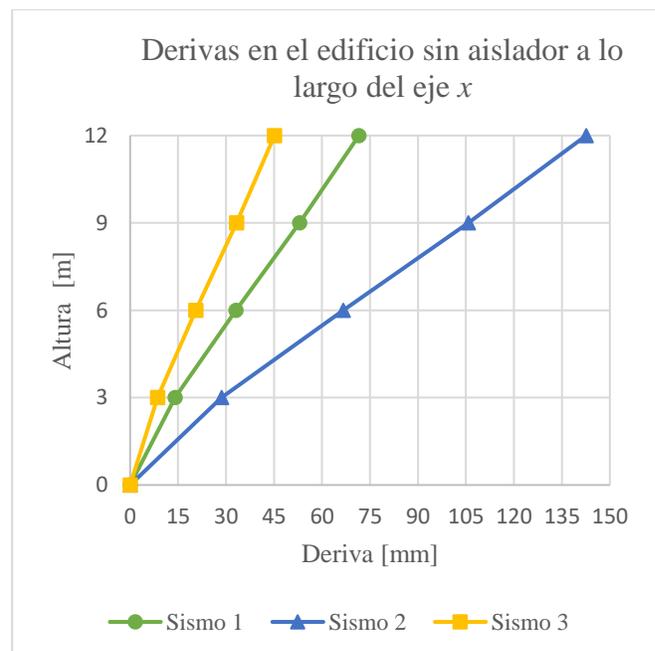


Figura 8. Derivas en el edificio sin aislador a lo largo del eje x

La Figura 8 presenta las derivas promedio del edificio sin aislar, sometido a los tres casos de carga sísmica mencionados en el sentido x . En el caso del sismo 1 se presentan derivas con valores promedios de 18 mm por piso con un valor de deriva total máximo de 72 mm. El valor de deriva máximo en el eje x se obtuvo para el sismo 2, llegando a tener 143 mm de deriva total, lo contrario ocurre en el sismo 3 donde las derivas presentaron los valores de menor dimensión siendo estos de 45 mm. Para los 3 casos se aprecia que los valores de las derivas son un 7% menores en el primer piso.

De manera similar, en la Figura 9 se presentan los valores promedios de la deriva en el sentido Y para los 3 casos de carga sísmica. La principal diferencia de esta figura con la anterior es que el mayor valor de deriva ahora lo presenta el sismo 1, teniendo un máximo de 138 mm, siendo 5mm menor que el máximo de la Figura 8. El sismo 2 y sismo 3 presentan un comportamiento muy similar entre sí, con una variación no mayor a 2 mm y un máximo de 66 mm y 68 mm de deriva total respectivamente. Al igual que en el eje x .



Figura 9. Derivas en el edificio sin aislador a lo largo del eje y

3.3. Derivas del edificio con Aislador

Uno de los objetivos del aislador sísmico es reducir las derivas entrepiso, esto se obtiene gracias a que gran parte de la deformación de la estructura se presenta ahora como deformación en el aislador,

por este motivo se presenta un gran desplazamiento en la base como se muestra en la Figura 10.



Figura 10. Derivas en el edificio con aislador a lo largo del eje x

En esta figura se puede apreciar para el sismo 1 el mayor desplazamiento en base con 116 mm de deformación de los aisladores y una deriva total respecto a este punto de 12.6 mm, siendo esta 6 veces menor que la deriva que presenta en el mismo caso del edificio sin aislar. En el caso del sismo 2 el desplazamiento en base es de 85.3 mm con una deriva total de 8.8 mm. Al igual que en el edificio sin aislar el menor valor de deriva en el eje x lo presenta el sismo 3 siendo este de 5.3 mm con un desplazamiento de base de 74.4 mm.

La Figura 11 presenta los valores de la deriva a lo largo del eje y . El sismo 1 en el caso de este eje ahora presenta los menores valores de deriva, con un desplazamiento en base de 76.3 mm y una posición final del último piso de 85.4 mm respecto a su posición inicial; es decir, una deriva total de 9.1 mm. En el sismo 2 y 3 se puede apreciar un comportamiento muy similar entre ellos, llegando a casi sobreponerse en la gráfica, el primer sismo presenta un desplazamiento en base de 103.8 mm y el segundo de 103.6 mm, con una deriva máxima de 11.8 mm y 7.8 mm respectivamente, siendo la presentada por el sismo 2 la mayor en el eje y .

Realizando una comparación global del edificio aislado y sin aislar se aprecia una reducción

promedio del 89.43% de las derivas máximas cuando se utiliza aisladores sísmicos.

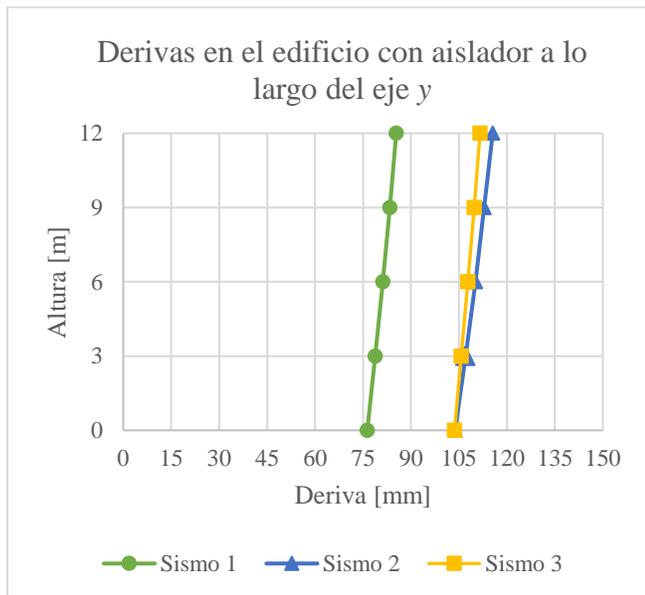


Figura 11. Derivas en edificio con aislador a lo largo del eje y

3.4. Aceleraciones para la edificación sin aislamiento

Los daños en los muebles e inmuebles no se deben únicamente por el desplazamiento del suelo sino también a la aceleración y desaceleración que genera en la estructura durante un sismo, por ello es necesario el análisis del comportamiento de la aceleración espectral en el edificio aislado y sin aislar.



Figura 12. Aceleraciones del edificio sin aislar a lo largo del eje x

En la Figura 12 se muestran las aceleraciones máximas de piso a lo largo del eje x para un edificio sin aislar, siendo el sismo 2 el que refleja el valor máximo de aceleración de todos los casos sísmicos presentados en el edificio con aislamiento con 3.02 m/s^2 y un incremento promedio de 0.75 m/s^2 por cada piso. Un valor muy próximo al 50% de la aceleración máxima del sismo 2 se puede apreciar en la aceleración presentada en el sismo 1 y sismo 3, siendo para el caso del sismo 1 de 1.48 m/s^2 y 1.29 m/s^2 para el sismo 2 con incrementos de aceleración por piso de 0.37 m/s^2 y 0.32 m/s^2 respectivamente.

Las aceleraciones a lo largo del eje y se pueden apreciar en la Figura 13. En este caso se presenta un valor de 2.86 m/s^2 para el sismo 1, siendo esta la de mayor magnitud obtenida en este eje con un crecimiento promedio de aceleración por piso de 0.71 m/s^2 , detrás de este se presenta el sismo 3 con un valor de 1.94 m/s^2 y un incremento promedio de 0.48 m/s^2 por piso. Finalmente, el menor valor de aceleración para el eje x es expresado por el sismo 2 con 1.4 m/s^2 de aceleración máxima y 0.35 m/s^2 de incremento por piso. Estas aceleraciones en ambos sentidos representaran valores de una magnitud considerablemente alta, sin embargo, la edificación sin aislador es capaz de soportar cargas de esta magnitud sin presentar un daño estructural sustancial.



Figura 13. Aceleraciones del edificio sin aislar a lo largo del eje y

3.5. Aceleraciones para la edificación aislada

En el caso del edificio aislado los incrementos de aceleración entre piso son diminutos, llegando a ser valores despreciables.

Las aceleraciones máximas de piso para un edificio aislado se presentan en la Figura 14 para el eje x y en la Figura 15 en el eje y . En ambas figuras se puede apreciar la existencia de aceleraciones en la base de la estructura respecto al suelo debido al desplazamiento generado por la deformación del aislador. También se nota una disminución significativa de la aceleración en planta, llegando a representar en promedio solo el 13% de las obtenidas en un edificio sin aislamiento sísmico.

Las aceleraciones a lo largo del eje x se muestran en la Figura 14, siendo el sismo 1 el que presenta un valor de aceleración de 0.128 m/s^2 en base y 0.143 m/s^2 en el último nivel. Para el sismo 2 y sismo 3 los valores disminuyen y se comportan de manera similar entre sí, teniendo en ambos casos 0.095 m/s^2 y 0.100 m/s^2 en base, mientras que el máximo en el último piso es de 0.106 m/s^2 y 0.108 m/s^2 , respectivamente.

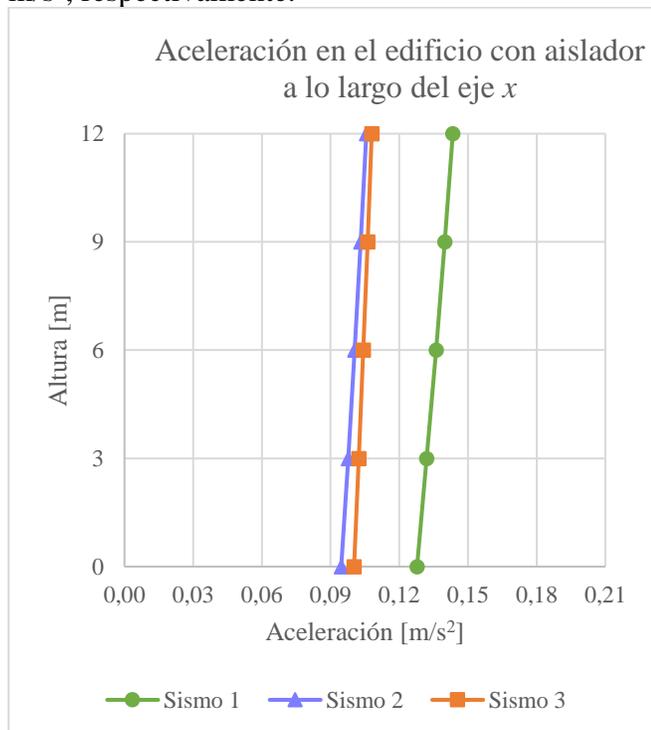


Figura 14. Aceleraciones en el edificio con aislador a lo largo del eje x

Para las aceleraciones en un edificio aislado a lo largo del eje y se puede observar la Figura 15 donde se presentan valores máximos de aceleración en el sismo 3 con 0.150 m/s^2 en base y 0.162 m/s^2 en su mayor altura. Para el sismo 2 se obtuvo valores de 0.128 m/s^2 para la base y un máximo de 0.143 m/s^2 . En el sismo 1 se presentan los menores valores de aceleración de todo el estudio con 0.094 m/s^2 en la base y 0.105 m/s^2 para su máxima altura.

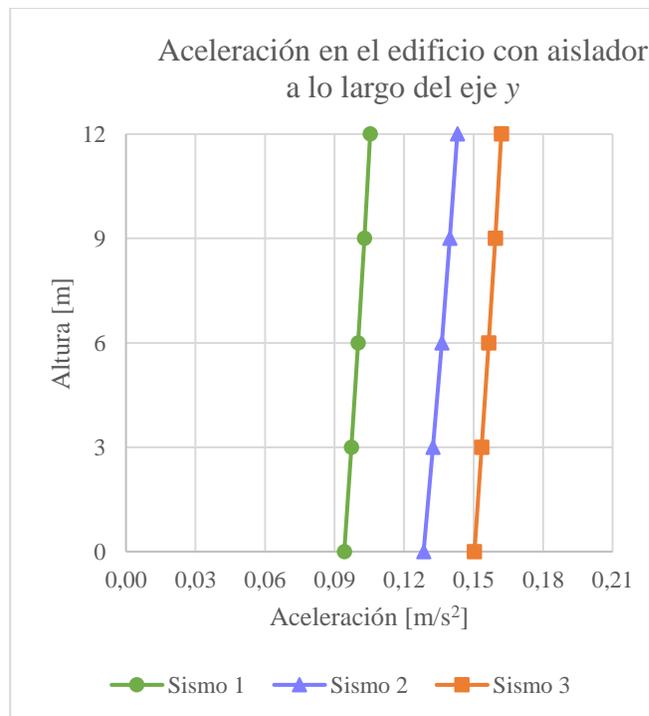


Figura 15. Aceleraciones en el edificio con aislador a lo largo del eje y

4. Conclusiones

El aislador sísmico sometido a carga a 1200 kg de compresión y un desplazamiento de diseño esperado de 128 mm para un sismo MCE no presentó zonas donde se superase el esfuerzo de fluencia de los materiales. Para las placas exteriores de acero de 25 mm el esfuerzo máximo presentado fue de 13.08 MPa por lo que no representa riesgo alguno de falla. En las placas interiores de acero de 2 mm aparecen tensiones máximas de 321 MPa , 25 MPa por debajo del permisible. Para el caso del elastómero las tensiones presentadas no superaron los 7.29 MPa en las zonas concentradoras de esfuerzos. Bajo estas condiciones en el caso de un

aislador sísmico real no se presentaría daño alguno frente a un sismo MCE.

Para la edificación metálica sin aislamiento se obtuvieron derivas entrepiso con valores máximos de 40.42 mm. Se notó una mayor vulnerabilidad para las cargas sísmicas en el eje x donde los valores promedios de las derivas fueron un 7% mayor a los presentados en el eje y . Las aceleraciones de piso presentaron un incremento lineal promedio de 0.96 m/s^2 con un valor máximo de 3.02 m/s^2 . Con estos valores y en base a la escala Mercalli se puede concluir que en el edificio sin aislamiento presentaría daños moderados frente a un sismo de gran magnitud con probabilidad de ocurrir una vez en cada 250 años. En el mismo caso, un edificio con sistemas de aislamiento no presentaría ningún daño estructural y la percepción del temblor en su interior sería leve.

El valor de la deriva entrepiso no sobrepasó los 2.06 mm, el desplazamiento lateral de base promedio fue de 92 mm con un máximo de 106 mm, por debajo del desplazamiento de diseño del aislador. Al igual que las derivas, las aceleraciones presentaron una reducción considerable con un promedio de 0.065 m/s^2 y un máximo de 0.084 m/s^2 . En base a los resultados obtenidos se concluye que el uso de aisladores sísmicos conduce a una mitigación sustancial de las cargas en la estructura.

Al realizar una comparación entre las dos edificaciones se obtuvo que las derivas presentadas con el edificio aislado fueron 18 veces menores que las producidas por el edificio sin aislamiento, además, las aceleraciones para el primer caso se redujeron en promedio un 87% en relación con las aceleraciones presentadas en el edificio sin aislar. Esto demuestra que los aisladores sísmicos son la opción idónea frente a los disipadores sísmicos cuando el edificio no sobrepasa los 10 pisos, su frecuencia sísmica es muy alta y los periodos cortos. Por esta razón se puede concluir que el aislador sísmico diseñado en esta investigación en aplicaciones reales cumplirá satisfactoriamente con su función.

Los aisladores sísmicos elastoméricos son reconocidos por incrementar el periodo de vibración de una estructura, desplazándolo a un rango donde las cargas sísmicas no representen un peligro. La edificación sin aislamiento sísmico presenta un periodo de vibración de 0.412 s, dentro de este rango se presentan los valores máximos de aceleración para un sismo MCE, mientras que la edificación aislada presentó un periodo de 2.868 s, situándose en rangos donde la aceleración espectral es cinco veces menor.

5. Recomendaciones

La implementación de un sistema de aislamiento sísmico en ocasiones es costosa, considerando que cada aislador puede llegar a tener un valor mayor a 3500 USD es recomendable buscar alternativas para la reducción de costos. En este estudio, el costo total de los elementos del sistema de aislamiento utilizando la misma dimensión de aislador alcanza los 84000 USD, es decir, el 5% del valor total del inmobiliario. Una alternativa para la reducción de costos es la utilización de aisladores de menor dimensión en las columnas exteriores donde las cargas solo representan el 70% de las presentadas en las columnas centrales.

Para edificaciones de baja altura es recomendable optar por el refuerzo de los miembros estructurales antes que utilizar un sistema de aislamiento sísmico debido a que la implementación de este último para estructuras con menos de dos pisos resultaría más costosa.

Los valores de derivas y aceleraciones se pueden utilizar para estimar el impacto de un sismo en una edificación, sin embargo, para determinar de mejor manera las pérdidas económicas que podrían presentarse en una estructura en caso de sismo es recomendable la utilización de software que permita el fácil estudio del comportamiento de miembros no estructurales como paredes, ventanas, cañerías, etc.

Referencias

- [1] J. Yang, M. D. Christie, S. Sun, D. Ning, N. Nakano, Z. Li, H. Du y W. H. Li, "Integration of an omnidirectional self-powering component to an MRE isolator towards a smart passive isolation system," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 144, n° 106853, 2020.
- [2] R. Rahnavard y R. J. Thomas, "Numerical evaluation of steel-rubber isolator with single and multiple rubber cores," *Engineering Structures*, vol. 198, n° 109532, 2019.
- [3] I. E. Madera Sie, D. Losanno, S. Strano, J. Marulanda y P. Thomson, "Development and experimental behavior of HDR seismic isolators for low-rise residential buildings," *Scopus*, vol. 183, pp. 894-906, 2019.
- [4] Y. M. Al-Anany y M. J. Tait, "Fiber reinforced elastomeric isolators for the seismic isolation of bridges," *Composite Structures*, vol. 160, pp. 300-311, 2017.
- [5] D. Losanno, H. A. Hadad y G. Serino, "Design charts for eurocode-based design of elastomeric seismic isolation systems," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 119, pp. 488-498, 2019.
- [6] A. Basshofi Habie, M. Gabriele y T. Tavio, "Two-step advanced numerical approach for the design of low-cost unbonded fiber reinforced elastomeric seismic isolation systems in new masonry buildings," *Engineering Failure Analysis*, vol. 90, pp. 380-396, 2018.
- [7] D. Losanno, I. E. Madera Sierra, M. Spizzuoco, J. Marulanda y P. Thomson, "Experimental assessment and analytical modeling of novel fiber-reinforced isolators in unbounded configuration," *Composite Structures*, vol. 212, pp. 66-62, 2019.
- [8] Y. M. Al-Anany y M. J. Tait, "Experimental assessment of utilizing fiber reinforced elastomeric isolators as bearings for bridge applications," *Composites Part B: Engineering*, vol. 114, pp. 373-385, 2017.
- [9] P. M. Osgooei, D. Konstantinidis y M. J. Tait, "Variation of the vertical stiffness of strip-shaped fiber-reinforced elastomeric isolators under lateral loading," *Composite Structures*, vol. 144, pp. 177-184, 2016.
- [10] A. Calabrese, D. Losanno, M. Spizzuoco, S. Strano y M. Terzo, "Recycled Rubber Fiber Reinforced Bearings (RR-FRBs) as base isolators for residential buildings in developing countries: The demonstration building of Pasir Badak, Indonesia," *Engineering Structures*, vol. 192, pp. 126-144, 2019.
- [11] K. N. Kalfas, S. A. Mitoulis y K. Katakalos, "Numerical study on the response of steel-laminated elastomeric bearings subjected to variable axial loads and development of local tensile stresses," *Engineering Structures*, vol. 134, pp. 346-357, 2017.
- [12] R. Rahnavard, H. D. Craveiro y R. Napolitano, "Static and dynamic stability analysis of a steel-rubber isolator with rubber cores," *Structures*, vol. 26, pp. 441-455, 2020.
- [13] E. Tubaldi, S. A. Mitoulis, H. Ahmad y A. Muhr, "A parametric study on the axial behaviour of elastomeric isolators in multi-span bridges subjected to horizontal seismic excitations," *Bull Earthq Eng*, vol. 14, p. 1285-1310, 2016.
- [14] P. Castillo Ruano y A. Strauss, "An experimental study on unbonded circular fiber reinforced elastomeric bearings,"

- Engineering Structures*, vol. 177, pp. 72-84, 2018.
- [15] S. Radkia, R. Rahnavard, H. Tuwai, F. Abbas Gandomkar y R. Napolitano, «Investigating the effects of seismic isolators on steel asymmetric structures considering soil-structure interaction,» *Structures*, vol. 17, pp. 1029-1040, 2020.
- [16] S. Etedali, K. Hasankhoie y M. RezaSohrabi, "Seismic responses and energy dissipation of pure-friction and resilient-friction base-isolated structures: A parametric study," *Journal of Building Engineering*, vol. 29, n° 101194, 2020.
- [17] D. Altalabani, F. Hejazi, R. S. Bin Muhammad Rashid y F. N. Aznieta Abd Aziz, "Development of new rectangular rubber isolators for a tunnel-form structure subjected to seismic excitations," *Structures*, vol. 32, pp. 1522-1542, 2021.
- [18] N. Xiang, M. S. Alam y J. Li, "Shake table studies of a highway bridge model by allowing the sliding of laminated-rubber bearings with and without restraining devices," *Engineering Structures*, vol. 171, pp. 583-601, 2018.
- [19] O. Gauron, A. Saidou, A. Busson, G. Henrique Siqueira y P. Paultre, "Experimental determination of the lateral stability and shear failure limit states of bridge rubber bearings," *Engineering Structures*, vol. 174, pp. 39-48, 2018.
- [20] SAP 2000, Integrated Finite Element Analysis and Design of Structures., Barkely, USA: Computers and Structures Inc, 2018.
- [21] SolidWorks, SolidWorks Simulation Premium: No lineal, Massachusetts, E.E.U.U: Dassault Systemes SolidWorks Corporation, 2010.
- [22] MIDUVI, Norma ecuatoriana de la construcción: Peligro Sísmico y Diseño Sismo Resistente - NEC-SE-DS, Quito: Dirección de Comunicación Social, MIDUVI, 2014.
- [23] I. E. Madera Sierra, D. Losanno, S. Strano, J. Marulanda y P. Thomson, "Development and experimental behavior of HDR seismic isolators for low-rise residential buildings," *Scopus*, vol. 183, pp. 894-906, 2019.
- [24] D. Losanno, I. E. Madera Sierra, M. Spizzuoco, J. Marulanda y P. Thomson, "Experimental performance of unbonded polyester and carbon fiber reinforced elastomeric isolators under bidirectional seismic excitation," *Engineering Structures*, vol. 209, n° 110003, 2020.
- [25] P. Asadi, D. Nikfar y I. Hajirasouliha, "Life-cycle cost based design of bridge lead-rubber isolators in seismic regions," *Structures*, vol. 27, pp. 383-395, 2020.
- [26] T. Basar, S. K. Dep, P. J. Das y M. Sarmah, "Seismic response control of low-rise unreinforced masonry building test model using low-cost and sustainable unbonded scrap tyre isolator (U-STI)," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 142, n° 106561, 2021.
- [27] M. Pauletta, "Method to design fiber-reinforced elastomeric isolators (U-FREIs) and application," *Engineering Structures*, vol. 197, n° 109366, 2019.
- [28] R. Aguiar Falconí, J. Luis Almazán, P. Dechent y V. Suárez, "Propiedades mecánicas de los elastómeros," de *Aisladores de base elastométicos y FPS*, Quito, Comisión Editorial de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, 2016, p. 253.
- [29] S. Abedi Koupai, A. Bakhshi y V. Valadoust Tabrizi, "Experimental investigation on effects of elastomer

components on dynamic and mechanical properties in seismic isolator compounds," *Construction and Building Materials*, vol. 135, pp. 267-278, 2017.

- [30] M. Shahzad, A. Kamran, M. Zeeshan Siddiqui y M. Farhan, "Mechanical Characterization and FE Modelling of a Hyperelastic Material," *Materials Research*, vol. 18, pp. 918-924, 2015.