



**MODELACIÓN NUMÉRICA DE AISLADORES SÍSMICOS DESCONECTADOS
FIBRO-REFORZADOS CON MATRIZ DE CAUCHO RECICLADO**

Programa de Maestría en Ingeniería Civil

Presentado por

LISETH ANDREA MUÑOZ GUTIERREZ

Directora: Ingrid E. Madera Sierra, PhD.

Pontificia Universidad Javeriana Cali

Facultad de Ingeniería y Ciencias

2025

1

TABLA DE CONTENIDO

LISTA DE FIGURAS	4
LISTA DE TABLAS	5
ABSTRACT	6
RESUMEN.....	7
1. INTRODUCCIÓN	8
2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	10
2.1 Planteamiento del problema.....	10
2.2 Pregunta de investigación	13
2.3 Alcance del trabajo de grado.....	13
3. OBJETIVOS DEL PROYECTO.....	15
3.1 Objetivo general.....	15
3.2 Objetivos específicos	15
3.3 Resultados esperados	15
4. JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO DE GRADO	16
5. MARCO DE REFERENCIA	19
5.1 Antecedentes	19
5.2 Estado del Arte.....	21
5.3 Marco Teórico.....	25
5.3.1 Aspectos generales	25
5.3.2 Modelación de elementos finitos	31
6. MODELO DE ELEMENTOS FINITOS	34
6.1 Geometría del prototipo	34
6.2 Materiales.....	35
6.3 Definición del modelo	37
6.4 Carga	39
6.5 Ajuste FEM.....	41
6.6 Validación del modelo	45
7. ANALISIS DE LOS EFECTOS DEL CAMBIO DE FACTOR DE FORMA	49
8. ANÁLISIS DE LOS EFECTOS DEL CAMBIO DE REFUERZO.....	62
9. CONCLUSIONES	68

10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	71
11. GLOSARIO DE TÉRMINOS ESPECIALES	77

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Tipos de aisladores elastoméricos a) SREI, y b) FREI. (I. E. Madera Sierra 2018)	26
Figura 2 Área efectiva para aisladores circulares (A_{eff}) (I. E. Madera Sierra 2018).	30
Figura 3. Procedimiento de análisis por elementos finitos. (Kim and Sankar 2008)	32
Figura 4. Esquema de modelación por elementos finitos para un aislador sísmico (Fuente: elaboración propia).	33
Figura 5. Geometría del prototipo	35
Figura 6. Condiciones de borde	38
Figura 7. Malla sobre el prototipo	38
Figura 8. (a) Montaje experimental, (b) Protocolo de carga/desplazamiento en el ensayo de compresión cíclica.	39
Figura 9. (a) Montaje experimental, (b) Protocolo de carga/desplazamiento en el ensayo de corte	40
Figura 10. Campo de desplazamiento en la dirección de la carga lateral para $0.25DM$, (a) Modelo FEM, (b) Montaje experimental.	44
Figura 11. Campo de desplazamiento en la dirección de la carga lateral para $1.00DM$, (a) Modelo FEM, (b) Montaje experimental.	45
Figura 12. Curvas fuerza-desplazamiento durante un ensayo de compresión para el prototipo de caucho reciclado con refuerzo de fibra de poliéster.	46
Figura 13. Curvas fuerza-desplazamiento durante un ensayo de corte para el prototipo de caucho reciclado con refuerzo de fibra de poliéster.	47
Figura 14. Rigidez horizontal prototipos con igual diámetro y diferente altura de aislador	55
Figura 15. Amortiguamiento prototipos con igual diámetro y diferente altura de aislador	56
Figura 16. Rigidez horizontal prototipos con igual diámetro y diferente espesor de caucho	57
Figura 17. Amortiguamiento prototipos con igual diámetro y diferente espesor de caucho	57
Figura 18. Rigidez horizontal prototipos con igual altura y diferente diámetro de aislador	58
Figura 19. Amortiguamiento prototipos con igual altura y diferente diámetro de aislador	59
Figura 20. Rigidez horizontal prototipos con igual espesor de caucho y diferente diámetro de aislador	60
Figura 21. Amortiguamiento prototipos con igual espesor de caucho y diferente diámetro de aislador	61
Figura 22. Resultados a) rigidez horizontal y b) amortiguamiento para distintas deformaciones	65

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Sismos en América del Sur en los últimos 500 años (NOAA 2023).	10
Tabla 2. Parámetros modelo Bergstrom-Boyce (BB).....	36
Tabla 3. Parámetros hiperelásticos del caucho (Rodriguez et al. 2024).....	36
Tabla 4. Parámetros viscoelásticos del caucho (Rodriguez et al. 2024).	36
Tabla 5. Propiedades Ortotrópicas del refuerzo de fibra de polyester del prototipo (I. Madera Sierra 2018).	37
Tabla 6. Coeficientes del modelo de Bergstrom-Boyce (BB) para el aislador en compresión (Rodriguez et al. 2024).	42
Tabla 7. Coeficientes del modelo de Bergstrom-Boyce (BB) para el aislador en corte (Rodriguez et al. 2024).	43
Tabla 8. Resultados del ensayo de compresión del prototipo de caucho reciclado con refuerzo de fibra de poliéster.	45
Tabla 9. Rigidez horizontal y amortiguamiento para $\gamma_s=25\%$, 50% , 67% , 100% , 100% and 75%	48
Tabla 10. Variación de número de capas de caucho y fibra	52
Tabla 11. Variación del espesor del caucho	52
Tabla 12. Rigidez horizontal y amortiguamiento P1 al P15.....	53
Tabla 13. Rigidez horizontal y amortiguamiento P16 al P30.....	53
Tabla 14. Compresión cíclica, MEF y resultados teóricos	64
Tabla 15. Resultados KH_{FEM} [N/mm]	64
Tabla 16. Resultados de la caracterización mecánica de refuerzos (Rivas Ordoñez et al. 2024).....	66

ABSTRACT

This study develops a numerical model to evaluate the behavior of fiber-reinforced elastomeric seismic isolators with a recycled rubber matrix (U-FREIs) using the finite element method (FEM). Through simulation in ANSYS Workbench 2023 R2, the stress-strain response of the isolator was accurately reproduced and validated against experimental data. The analysis confirmed that the horizontal and vertical stiffness of the isolator is significantly influenced by the shape factor, allowing for an optimized design to improve structural stability. Additionally, different reinforcement materials were evaluated, identifying that glass fiber provides an optimal balance between flexibility and energy dissipation capacity. The study demonstrated that numerical modeling is an effective tool for predicting the behavior of these devices, reducing the need for physical testing and optimizing their design at a lower cost. It is concluded that U-FREIs made from recycled rubber represent a viable and sustainable alternative for seismic protection in buildings, particularly in high-risk seismic regions.

Key words: Finite elements models (FEM), Recycled rubber, Seismic isolator Unbonded fiber-reinforced elastomeric isolators (U-FREIs), Shape factor, horizontal and vertical stiffness.

RESUMEN

Este estudio desarrolla un modelo numérico para evaluar el comportamiento de aisladores sísmicos fibro-reforzados con matriz de caucho reciclado (UR-FREIs) mediante el método de elementos finitos (FEM). A través de la simulación en ANSYS Workbench 2023 R2, se logró reproducir con precisión la respuesta esfuerzo-deformación del aislador, validando los resultados con datos experimentales. Los análisis confirmaron que la rigidez horizontal y vertical del aislador dependen significativamente del factor de forma, lo que permite optimizar su diseño para mejorar la estabilidad estructural. Asimismo, se evaluaron diferentes materiales de refuerzo, identificando que la fibra de fibra de vidrio proporciona un equilibrio óptimo entre flexibilidad y capacidad de disipación de energía. El estudio demostró que la modelación numérica es una herramienta efectiva para predecir el comportamiento de estos dispositivos, reduciendo la necesidad de ensayos físicos y optimizando su diseño a menor costo. Se concluye que los U-FREIs fabricados con caucho reciclado representan una alternativa viable y sostenible para la protección sísmica de edificaciones, especialmente en regiones de alto riesgo sísmico.

Palabras clave: Modelos de elementos finitos (FEM), Caucho reciclado, Aislador sísmico, Aisladores elastoméricos de fibra reforzada sin adherir (U-FREIs), Factor de forma, Rigidez horizontal y vertical.

1. INTRODUCCIÓN

Tener ciudades y comunidades sostenibles y resilientes es una de las propuestas más estratégicas para el medio de la construcción; pues, según las Naciones Unidas, entre el 70 y el 80% de la producción económica mundial y el 55% de la población mundial se concentran en las zonas urbanas. Debido a este incremento de personas en las ciudades, se prevé un rápido desarrollo de la industria automotriz mundial y, por tanto, la eliminación de una gran cantidad de llantas de desecho se convertirá en un problema ambiental que crece con el tiempo (Przydatek, Budzik, and Janik 2022). Estudios existentes sugieren que las partículas de caucho obtenidas de la trituración mecánica de neumáticos de desecho se pueden utilizar como material de Ingeniería Civil, y, desde la Ingeniería Estructural, se contemplan incluir como dispositivos adicionales de control de la respuesta sísmica (aisladores sísmicos). Los aisladores se añaden a la estructura con el fin de minimizar daños, puesto que, luego de un sismo, estas pueden reducir considerablemente su funcionalidad y, por lo tanto, requerir inversiones para su reparación o reconstrucción.

En los últimos años, los aisladores elastoméricos reforzados con fibra no adheridos (UFREI) se han aplicado como un método de protección sísmica los cuales, según resultados experimentales, muestran un deseado comportamiento de la estructura con una reducción significativa de aceleración y deriva entre pisos, con lo que se puede evitar métodos de construcción avanzados y complicados (A B Habieb 2020). Con base en lo anterior, en la Pontificia Universidad Javeriana Cali se llevó a cabo la fabricación de prototipos en escala reducida de aisladores de caucho reciclado reforzados con fibra sin conexión a la estructura (RU-FREIs), estableciendo que este material recuperado es una opción válida para el crecimiento de aisladores sísmicos en estructuras de bajo costo en países en desarrollo (I. E. Madera Sierra et al. 2020). Además, la aplicación de sistemas de control a los sistemas estructurales, puede lograr exitosamente estructuras más seguras, reflejadas en la protección de vida de las personas, en la reducción de daños y altos costos de reparación por sismos moderados y frecuentes (Ortega et al. 2023).

La modelación en elementos finitos (FEM) permite resultados para no linealidades de materiales y geometrías (A B Habieb 2020) los cuales representan y predicen el

comportamiento del aislador, así como varias propiedades bajo diferentes condiciones de carga (Madera Sierra et al. 2019), pues este método implica dividir el aislador de una estructura en partes más pequeñas y simples, con el fin de optimizar su diseño para maximizar su eficacia. Además, también se pueden calibrar y validar utilizando datos experimentales para garantizar que los modelos y su simulación, representen con precisión el comportamiento del sistema a escala real.

El uso del análisis de elementos finitos ofrece beneficios significativos al ahorrar tiempo y recursos, al evitar costosas simulaciones experimentales, y al permitir una mayor cantidad de pruebas al analizar diversas geometrías y tipologías. Se lleva a cabo una evaluación comparativa entre los resultados numéricos y los datos experimentales, considerando parámetros como el factor de forma, la relación de aspecto, la carga vertical y lateral, así como diferentes tipos de refuerzos, para determinar sus efectos en las propiedades mecánicas.

A partir de lo mencionado anteriormente, se realiza una investigación utilizando los resultados del análisis de elementos finitos. Se implementa, calibra y valida un modelo numérico para aisladores de caucho reciclado fibro-reforzados, y se diseña un conjunto de experimentos virtuales con el objetivo de obtener resultados confiables y precisos.

2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

2.1 Planteamiento del problema

A nivel mundial, más de un millón de sismos ocurren dando como resultando en un promedio de dos sismos por minuto. Un terremoto de gran magnitud en una zona urbana puede provocar muchas fatalidades (OPS 2021) pues posterior a los movimientos telúricos estos reducen significativamente la funcionalidad de construcciones y, por lo tanto, viviendas, edificios, puentes, hospitales e instalaciones educativas, requieren reparaciones costosas e incluso demolición y reconstrucción de las mismas (Chen et al. 2022).

Durante los últimos 500 años en América del Sur se han presentado 15 sismos con magnitud mayor a 6 en la escala de Richter y con más de 1000 muertes ocasionadas (Ver tabla 1), siendo en Colombia el sismo de Armenia el más catastrófico en este país, pues al menos 1185 personas perdieron la vida y se estima que solo en esta ciudad 41939 viviendas fueron destruidas (CEPAL 1999).

Tabla 1. Sismos en América del Sur en los últimos 500 años (NOAA 2023).

Año	Lugar	Magnitud	Número de Muertes
1687	Perú: Lima	8.5	5.000
1698	Ecuador: Tungurahua, Cotopaxi, Chimborazo	7.7	6.500
1725	Perú: Trujillo, Ancash, Lima	7.7	1.500
1746	Perú: Lima, Callao	8	1.141
1797	Ecuador: Riobamba, Quito, Cuzco	8.3	40.000
1812	Venezuela: La Guaira	7.7	26.000
1868	Chile: Arica	8.5	25.000
1868	Ecuador: Guayaquil, Ibarra; Colombia: San Pablo	7.7	70.000
1875	Colombia: Cúcuta, San Cayetano, Villa del Rosario	7.5	1.001
1906	Chile: South Central	8.2	4.000
1939	Chile: Chillan	8.3	30.000
1960	Chile: Puerto Montt, Valdivia	9.5	2.000
1970	Perú: Northern, Pisco, Chiclayo	7.9	66.794
1987	Ecuador: Napo Province, Quito, Tulcán	7.2	5.000
1999	Colombia: Armenia, Calarcá, Pereira, Caldas, Huila	6.2	1.185

Los aisladores de base son un sistema pasivo de control que disminuye la vulnerabilidad sísmica de estructuras en zonas de alta actividad sísmica. Estos dispositivos se colocan típicamente entre la subestructura y la superestructura para minimizar la transferencia de energía sísmica al prolongar el período horizontal fundamental del sistema (Thuyet 2017).

Debido a esto, la ausencia de estos dispositivos en las estructuras expone a personas, edificios e infraestructuras a un mayor riesgo de daños y colapso durante los terremotos. En Colombia, Madera Sierra investigó prototipos de aisladores de caucho natural, pero su uso comercial resulta costoso para la protección sísmica de estructuras comunes (Madera Sierra et al. 2019). Esto ha aumentado la necesidad de buscar materiales que permitan obtener dispositivos más económicos, considerando tres variables principales, simplificar la instalación, reducir el consumo de energía durante la fabricación y utilizar materiales más comunes o reciclados para disminuir el peso y los costos de los aisladores (Cilento, Losanno, and Piga 2022a).

En el 2021, la financiación de un proyecto de convocatoria interna entre la Universidad Javeriana Cali y la Universidad del Valle llevó a cabo el estudio de prototipos a escala reducida de aisladores de caucho reciclado fibro-reforzados sin conexión a la estructura (RU-FREIs), que establece que el caucho reciclado puede ser implementado como un material para la fabricación de aisladores sísmicos en estructuras de bajo costo (Ortega Escobar 2021). Si bien, se han encontrado resultados prometedores para aisladores sísmicos fibro reforzados de caucho reciclado (Calabrese et al. 2019; Cilento et al. 2022a; Habieb et al. 2022; Daniele Losanno et al. 2019a; Spizzuoco, Calabrese, and Serino 2014), hasta el momento estas investigaciones no cuentan con modelos o métodos analíticos representativos de los RU-FREIs que extiendan la posibilidad de predecir su comportamiento (Saremi and Toopchi-Nezhad 2021a).

La simulación por elementos finitos en aisladores se está volviendo cada vez más popular. Sin embargo, enfrenta desafíos debido a las múltiples consideraciones requeridas, como configuraciones, condiciones de borde, contacto, geometría y comportamiento elastomérico, así como la incompresibilidad del caucho reciclado (Calabrese 2013). Este proceso implica invertir tiempo y recursos considerables, y los resultados no son fácilmente alcanzables. Los

sistemas de aislamiento de base suelen exhibir un comportamiento no lineal, a menudo de tipo histerético y la fuerza restitutiva en estos sistemas no solo depende del desplazamiento actual, sino también de su evolución en el tiempo. La modelización analítica y la solución numérica de estos sistemas son difíciles de obtener (Molinares and Barbat 1994), pues dicha modelación requiere la utilización de un modelo constitutivo apropiado para el material y una evaluación precisa de los coeficientes del mismo. Además, es esencial calibrar adecuadamente los modelos antes de su implementación para determinar las propiedades mecánicas del conjunto de materiales que conforman el aislador (Tan et al. 2014), por lo que los resultados experimentales del proyecto de la convocatoria interna de la Universidad Javeriana Cali se deberán usar en esta investigación para la obtención de modelos óptimos.

A partir de los resultados experimentales, Madera Sierra propuso un modelo analítico para estimar la rigidez horizontal de aisladores no adheridos en su investigación de 2018 (I. E. Madera Sierra 2018). Este método ofrece una expresión para la rigidez horizontal que considera el módulo de corte efectivo y el área de contacto, teniendo en cuenta la influencia del comportamiento vertical. En comparación con otras formulaciones, se descubrió que el modelo propuesto era lo suficientemente preciso para su utilización en el diseño preliminar de aisladores elastoméricos reforzados con fibras no adheridas (Daniele Losanno et al. 2019a). No obstante, esta metodología presenta una falta de precisión en la determinación de la rigidez horizontal debido a la ausencia del factor de forma secundario. Es importante destacar que las características de rigidez y disipación de energía pueden ser ajustadas mediante modificaciones geométricas en la superficie plana cargada, ya que estas también afectan las propiedades verticales del aislador. Por consiguiente, resulta necesario comprender cómo las modificaciones en la superficie cargada alterarán simultáneamente el rendimiento horizontal y vertical del aislador, incluyendo el incremento de tensiones y los cambios en las distribuciones de presión ocasionados por estas modificaciones (Van Engelen 2019).

Por otra parte, se han realizado numerosas investigaciones enfocadas en sustituir el refuerzo tradicional de los aisladores, que normalmente es de acero, por materiales como fibra de carbono, vidrio, nailon o láminas de plástico para trabajos de ingeniería (Madera Sierra et al. 2019). El aislador elastomérico reforzado con fibra (FREI), a diferencia del

aislador elastomérico reforzado con acero (SREI), que se supone que es rígido tanto en extensión como en flexión, carece por completo de rigidez a la flexión (Moon et al. 2002). Como resultado, los RU-FREIs podrían sustituir aisladores convencionales si se logra encontrar un refuerzo común o modificado en términos de forma, que mejore la rigidez vertical del aislador. Sin embargo, los recursos necesarios para caracterizar diferentes refuerzos en cada prototipo serían elevados, pues cada tipo de refuerzo puede tener propiedades y comportamientos únicos, que modifican la rigidez, la capacidad de disipación de energía y la capacidad global, al realizar ensayos para cada posible combinación de refuerzos no se sería práctico en términos de eficiencia y economía.

2.2 Pregunta de investigación

A partir de lo anterior, surge la siguiente pregunta de investigación ¿cómo predecir el comportamiento de aisladores fibro-reforzados con matriz de caucho reciclado ante la variación de propiedades geométricas y de refuerzo? De la cual se derivan las siguientes preguntas: i) ¿cómo se puede utilizar la solución numérica para analizar el esfuerzo-deformación de los aisladores sísmicos?; ii) ¿cuál es el efecto en la rigidez horizontal y vertical de los RU-FREIs ante diversos factores de forma?; y iii) ¿cuál es el refuerzo flexible que mejor desempeño tiene en el aislador?

2.3 Alcance del trabajo de grado

La investigación propuesta es del tipo experimental exploratoria y se usará un análisis determinístico en todas las fases del proyecto. Del mismo modo, realizar modelaciones numéricas a través de elementos finitos dará lugar a una mejor comprensión del comportamiento de los aisladores fibro-reforzados con matriz de caucho reciclado, que permitan ser validadas con resultados experimentales para así evaluar su desempeño y funcionalidad.

Además, al modelar diferentes configuraciones de aisladores y variaciones en la relación altura-diámetro, permitirán obtener datos precisos sobre cómo cambia la rigidez del dispositivo en función de esta relación geométrica, así como la efectividad de diferentes tipos de refuerzo. Los hallazgos podrían tener implicaciones significativas en el campo de la

ingeniería sísmica, al ofrecer nuevas perspectivas sobre cómo mejorar la resistencia y el desempeño de los sistemas de aislamiento ante eventos sísmicos.

3. OBJETIVOS DEL PROYECTO

3.1 Objetivo general

Modelar numéricamente aisladores sísmicos fibro-reforzados con matriz de caucho reciclado para predecir su respuesta ante la variación de propiedades geométricas y de refuerzo.

3.2 Objetivos específicos

- Reproducir el comportamiento experimental esfuerzo-deformación por medio de una solución numérica.
- Predecir la influencia de los factores de forma en la rigidez horizontal y vertical del aislador.
- Analizar el aislador con distintos tipos de refuerzos flexibles para identificar las condiciones óptimas y mejorar su desempeño.

3.3 Resultados esperados

- Obtener un modelo calibrado capaz de reproducir los resultados experimentales de los aisladores mediante modelación por elementos finitos.
- Estimar la influencia de la relación entre la altura y diámetro de los aisladores en su rigidez horizontal y vertical.
- Evaluar el desempeño del aislador en términos de resistencia con diferentes tipos de refuerzos flexibles.

4. JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO DE GRADO

En los últimos años, ha aumentado la necesidad de utilizar dispositivos de control pasivo para prevenir el daño estructural causado por los sismos. El caucho, tanto natural como reciclado, ha sido ampliamente utilizado en la fabricación de aisladores sísmicos, ofreciendo protección a las estructuras durante dichos eventos. El uso de estos dispositivos se ha vuelto cada vez más popular debido a su eficacia para reducir los daños y su capacidad para absorber la energía liberada durante los sismos. Además, el reciclaje de materiales como las llantas usadas para producir aisladores sísmicos también se considera una alternativa sostenible que contribuye a la reducción de residuos y a la preservación del medio ambiente. Se estima que el consumo mundial anual de caucho natural supera los 15 millones de toneladas, mientras que los restos de caucho alcanzan más de 31 millones de toneladas (Cilento et al. 2022a).

De esta manera el desarrollo de aisladores sísmicos puede contribuir a tres de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). En relación con el ODS 9 de Infraestructura, se reconoce que la industria de la construcción es una de las principales fuentes de contaminación. Por lo tanto, al desarrollar construcciones fiables, sostenibles, resilientes y de alta calidad, no solo se impulsa el desarrollo económico de las regiones, sino que también, mediante la innovación y el progreso tecnológico, se pueden encontrar soluciones duraderas para los desafíos ambientales. Esto a su vez contribuye a los objetivos 11 y 12, promoviendo la producción y el consumo responsables para preservar nuestro planeta (UN 17AD).

En un estudio realizado en 2019 por Losanno et al., se analizaron dos tecnologías diferentes para la protección de estructuras: aisladores elastoméricos reforzados con fibra de caucho natural (UN-FREI) y aisladores de caucho reciclado (RU-FREI). Los resultados mostraron que el rendimiento de los UN-FREI era superior al de los RU-FREI. Sin embargo, a pesar de estos hallazgos, los dispositivos fabricados con caucho reciclado mostraron ser una opción prometedora para proteger las construcciones, especialmente considerando el costo en comparación con las tecnologías convencionales (Daniele Losanno et al. 2019a).

Para caracterizar el comportamiento de los aisladores, se emplea la técnica de elementos finitos, la cual permite dividir la geometría en elementos más pequeños mediante modelos constitutivos. Esto se logra mediante la utilización de modelos bidimensionales para

elementos tipo tira y modelos tridimensionales para otras geometrías consideradas (Calabrese 2013). Posteriormente, se resuelven las ecuaciones de movimiento para determinar las condiciones mecánicas en el prototipo del aislador, considerando diversos escenarios y cargas.

En muchos casos, se emplea un modelo de material hiperelástico para reproducir el comportamiento carga-desplazamiento (Saremi and Toopchi-Nezhad 2021a), dichas modelaciones, conducen a simulaciones de respuesta efectiva que sirven como una herramienta valiosa para finalizar el diseño preliminar y reducir los altos costos de las repeticiones de prueba, necesarias para lograr resultados optimizados del aislador (Habieb, Valente, and Milani 2019). El análisis para aisladores sísmicos por elementos finitos puede considerarse una herramienta eficaz especialmente para desplazamientos aplicados grandes, que de algún modo pueden resultar difíciles en un estudio experimental (Van Ngo, Dutta, and Sajal K Deb 2017).

Se han propuesto diversos modelos analíticos para estimar la rigidez horizontal en aisladores elastoméricos reforzados con fibra no adherida (U-FREI). Estos modelos consideran características como el refuerzo, el área efectiva y el módulo de cortante del caucho, así como parámetros geométricos como el factor de forma, tamaño, altura y agujeros de los U-FREI (Al-Anany, Van Engelen, and Tait 2017; Galano et al. 2022; Osgooei, Tait, and Konstantinidis 2014; Sierra, Valle, and Valle 2019). Estas investigaciones se enfocan en evaluar el comportamiento vertical y horizontal de los aisladores mediante cargas cíclicas y monótonas, utilizando caucho natural con diferentes materiales de refuerzo y matriz. Se analizan propiedades como el módulo de corte, el amortiguamiento y la rigidez en ambas direcciones (vertical y horizontal) (Daniele Losanno et al. 2019a). En la mayoría de los casos se muestra buena concordancia y relación al comparar los resultados obtenidos con los métodos analíticos propuestos con experimentales y numéricos (Van Ngo, Dutta, and Sajal K Deb 2017).

Como alternativa al aislador reforzado con acero convencional, donde se utilizan placas de acero gruesas e inflexible, diversos estudios han investigado el uso de refuerzos delgados y flexibles, como la fibra (H. Toopchi-Nezhad , M.J. Tait 2010; Daniele Losanno et al.

2019a; Madera Sierra et al. 2019; Sierra et al. 2019; Toopchi-Nezhad, Tait, and Drysdale 2011), Estos estudios han demostrado que el refuerzo de fibra puede mejorar las propiedades de amortiguamiento y disipación de energía del aislador. Por ejemplo, al comparar una fibra de poliéster bidireccional con una fibra de carbono, se determinó que el U-FREI con fibra de carbono reduce la rigidez lateral efectiva, la cual disminuye a medida que aumenta el desplazamiento lateral (Osgooei et al. 2014).

Además, se ha evaluado la elección entre fibras de carbono y fibras de vidrio como refuerzo, y se ha encontrado que la rigidez vertical es mayor con la fibra de carbono, lo que lleva a seleccionar esta opción para el aislador (Moon et al. 2002; Spizzuoco et al. 2014). También se ha observado que las láminas de plástico presentan mayor capacidad de amortiguación y menor rigidez que las de acero (Tan et al. 2014), y al introducir agujeros horizontales que representan el 5% del volumen del caucho, se produce una reducción en la rigidez horizontal (Galano et al. 2022). Estas propiedades favorables hacen que los refuerzos sean opciones válidas para el desarrollo de aisladores sísmicos en países en vías de desarrollo, y permiten seleccionar el refuerzo más adecuado en términos de propiedades y costos.

Es fundamental garantizar que los enfoques y modelos utilizados sean confiables para la modelación de los aisladores, así como realizar investigaciones y estudios a gran escala que aceleren el proceso de desarrollo y fabricación. Esto contribuirá a reducir el tiempo requerido en la investigación y garantizar la calidad y confiabilidad de los aisladores sísmicos.

5. MARCO DE REFERENCIA

5.1 Antecedentes

El concepto de aisladores sísmicos se está incorporando gradualmente en la construcción sismorresistente, lo que ha impulsado el desarrollo de dispositivos de aislamiento innovadores.

Desde 1969, se han utilizado elastómeros para el aislamiento sísmico debido a su bajo módulo de corte, su casi incompresibilidad y la capacidad de adaptarse a grandes deformaciones recuperables con niveles de tensión relativamente bajos (Van Engelen 2019). En 1971, J.M. Kelly llevó a cabo investigaciones exhaustivas sobre aisladores de caucho para el aislamiento sísmico y realizó numerosos estudios en estructuras aisladas. Gran parte de su investigación se centró en los aisladores elastoméricos reforzados con láminas de acero, pero también consideró el uso de refuerzos de fibra (FREI) en lugar de acero, los cuales son más livianos y podrían acelerar el proceso de fabricación e instalación (Tsai and Kelly 2001).

En 2008 se estudiaron aisladores elastoméricos no adheridos reforzados con fibra (NU-FREI) los cuales poseen propiedades mecánicas adecuadas para su uso en la protección sísmica a estructuras. Su comportamiento se caracteriza por deformaciones de vuelco, lo que reduce la rigidez efectiva del sistema de aislamiento, disminuyendo la demanda sísmica y el contacto bajo cargas horizontales, limitando el desplazamiento horizontal del aislador (Habieb et al. 2019).

Posteriormente, en 2014 se consideró el caucho reciclado como una alternativa para reducir tanto el costo directo de las construcciones como el impacto ambiental asociado a los desechos de neumáticos pues al evaluar el rendimiento de aisladores elastoméricos reforzados con fibra no adheridos de caucho natural (NU-FREI) con aisladores de caucho reciclado (RU-FREI) se encontró que aunque los NU-FREI tenían un mejor rendimiento que los RU-FREI, los dispositivos de caucho reciclado eran prometedores bajo excitaciones de magnitud sísmica, siendo una tecnología ideal para edificios convencionales (D. Losanno et al. 2019).

Debido a las similitudes entre los NU-FREIs y RU-FREIs, existe una tendencia a comparar los dos tipos de aisladores; sin embargo, es difícil lograr una semejanza directa entre ellos debido a las diferencias en las propiedades mecánicas y de materiales. Por ello, esta investigación proporciona una descripción general completa del estado del conocimiento de los RU-FREIs, incluyendo propiedades críticas de diseño, así como modelos analíticos y numéricos los cuales permiten predecir el comportamiento de los aisladores.

Anteriormente, el análisis de los aisladores sísmicos elastoméricos se basaba en métodos simplificados y ensayos en laboratorio. Sin embargo, los avances en computación y simulación numérica han permitido realizar análisis más precisos y detallados mediante el uso de elementos finitos y modelos constitutivos adecuados basados en la mecánica de medios continuos.

Los primeros modelos se enfocaron en dispositivos de elastómero laminado con núcleo de plomo y se implementaron en la simulación de puentes colgantes con aisladores sísmicos (Ali and Abdel-Ghaffar 1995). Este estudio enfatiza que no se debe subestimar el efecto disipativo del caucho en dispositivos con elastómeros altamente amortiguados, o con elastómeros normales que experimentan deformaciones del 200% o más. También proporciona comparaciones con resultados experimentales para deformaciones por esfuerzo cortante inferiores al 75%, mostrando una muy buena aproximación en dichos casos.

Debido al elevado costo computacional y problemas de convergencia de algunos modelos a la fecha, algunos autores desarrollaron un modelo continuo homogéneo equivalente para analizar materiales compuestos por capas. Sin embargo, en su análisis, consideran el elastómero como un material puramente elástico y excluyen sus propiedades disipativas. La mayoría de los resultados presentados por Herrmann, Hamidi, Shafiqh-Nobari y Ramaswamy (1988) se centran en deformaciones verticales causadas por esfuerzos de compresión, sin abordar las deformaciones por esfuerzos de cortante con carga cíclica horizontal, que son importantes en dispositivos destinados al aislamiento sísmico de base (Herrmann et al. 1989).

Teniendo en cuenta esta situación, el trabajo de Salomón et al. (2000) representó un avance en la integración de la simulación de elementos finitos en el análisis de aisladores sísmicos elastoméricos. Su enfoque permitió un estudio más completo y detallado de estos

dispositivos, mejorando la comprensión de su comportamiento y proporcionando herramientas más precisas para su diseño y evaluación (Salomón, Oller Martinez, and Barbat Barbat 2000).

Más adelante, en el 2011 se presentaron modelos de elementos finitos para aisladores elastoméricos reforzados con tiras de fibra (FREI) bajo cargas estáticas verticales y laterales. El modelo puede simular tanto condiciones de contacto adheridas como no adheridas en las superficies del aislador. Se abordan los desafíos adicionales causados por cambios en las condiciones de contorno debido a la deformación tipo rollover. Se compararon las respuestas laterales de dos tipos de FREI: B-FREI y SU-FREI adheridos y estables no adheridos respectivamente con el mismo material y propiedades geométricas, sometidos a cargas verticales constantes. Los resultados mostraron que el SU-FREI fue considerablemente más eficiente que el B-FREI en términos de respuestas laterales (Toopchi-Nezhad et al. 2011).

En el 2013, Calabrese estudió el comportamiento de carga-desplazamiento y el estado de tensión se los aisladores en forma de tira, cuadrados y circulares utilizando un análisis de elementos finitos, el objeto de estudio fue aisladores con caucho reciclado reforzados con fibra (RR-FRBs), los resultados numéricos mostraron el alto potencial de los aisladores de bajo costo para reducir el daño en las estructuras (Calabrese 2013).

5.2 Estado del Arte

La modelación numérica mediante elementos finitos (FEM) se ha convertido en una herramienta para el análisis y diseño de estructuras aisladas sísmicamente.

El desarrollo y evaluación del desempeño de aisladores sísmicos de bajo costo ha sido abordado mediante pruebas de rendimiento sistemáticas. Estas pruebas se enfocan en caracterizar el comportamiento mecánico de los aisladores frente a la compresión, el cortante y la relación de ambas. Además, se evalúan propiedades dinámicas como el amortiguamiento y el estado último. Para un análisis detallado de estos comportamientos, se utilizan modelos de elementos finitos que son calibrados con datos experimentales. Los estudios realizados por Domenico et al., Ruano & Strauss, Sierra et al. y Wang et al. han hecho contribuciones significativas en la evaluación de las demandas máximas de tensión y deformación en los componentes de los aisladores, brindando así soporte para el diseño y la fabricación de

aisladores fibro reforzados no adheridos (Domenico, Losanno, and Vaiana 2023; Ruano and Strauss 2021; Sierra et al. 2019; Wang et al. 2023).

Para investigar el comportamiento bajo carga sísmica en diferentes casos de aisladores desconectados, Saremi y Toopchi-Nezhad desarrollaron un modelo capaz de simular condiciones de contorno tanto unidas como no unidas en las superficies de contacto. Este modelo se realizó en el software MSC. Marc y permite analizar cualquier combinación de cargas verticales y laterales estáticas, demostrando que los aisladores desconectados tienen una mayor capacidad de disipación de energía y reducen la generación de tensión por deformaciones a cortante. Ambos aisladores utilizados en el estudio compartían el mismo material (elastómero y fibra), propiedades geométricas y cargas verticales, y se actualizó la malla FE utilizada durante el análisis para adaptarse a la geometría deformada del aislador. El análisis presentado emplea un modelo Neo-Hookean como el modelo de material hiperelástico disponible más simple para materiales elastoméricos (Saremi and Toopchi-Nezhad 2021a; Toopchi-Nezhad et al. 2011).

Evaluaciones basadas en elementos finitos han demostrado que el diseño de aisladores sísmicos rentables utilizando refuerzos de fibra de láminas de plástico, en este caso el modelo del aislador se desarrolla en ABAQUS y se calibra con los datos experimentales (Tan et al. 2014), se encontró que el modelo puede lograr una rigidez horizontal simulada del aislador equivalente al 94.8% del valor ensayado. Además, se ha encontrado que las placas de plástico de ingeniería pueden sustituir a los refuerzos de acero en los aisladores, presentando una amortiguación un 8% mayor que el acero. Los aisladores con estas placas han experimentado una deformación del 250% bajo cargas verticales constantes. Sin embargo, presentan una menor rigidez horizontal en comparación con los refuerzos de acero (Tan et al. 2014). En otros casos, el error promedio en la evaluación de la rigidez horizontal efectiva y equivalente, y la relación de amortiguamiento del aislador era de aproximadamente el 8% y 10% respectivamente (Ruano and Strauss 2021; Saremi and Toopchi-Nezhad 2021a)

Se estudió la relación de aspecto, que es la proporción entre la longitud y altura total del aislador. En este caso, se empleó el software MSC Marc para modelar las capas de refuerzo elastomérico y de fibra utilizando elementos hexaedros isoparamétricos de integración total

lineal de ocho nodos. El modelo constitutivo neo-hookeano comprimible se utilizó para describir el elastómero, considerando sus módulos de corte y volumen. Al analizar la respuesta lateral de aisladores cuadrados asimétricos con diferentes relaciones de aspecto (1.9, 2.6 y 2.9) y cargas aplicadas en distintas direcciones (0° , 15° , 30° y 45°), se concluyó que a medida que disminuye la relación de aspecto, aumenta la sensibilidad de la respuesta lateral a la dirección de carga. Además, se observó que reducir la altura del aislador disminuye su respuesta lateral, mientras que las relaciones de aspecto más altas ofrecen una respuesta al vuelco estable en diversas direcciones de carga (Osgooei et al. 2014). En un estudio adicional, se encontró que, al realizar modificaciones en un aislador mediante pruebas experimentales y análisis de elementos finitos (FEA), se obtuvo una mejora en la respuesta del U-FREI al crear patrones simples de agujeros en las capas elastoméricas. Al eliminar el 5% del volumen de caucho, el aislador presentó una reducción en su rigidez horizontal y un mayor rango de deformación lateral (Galano et al. 2022). Asimismo, se investigó experimentalmente la influencia de orificios en las propiedades verticales y horizontales de los U-FREI cuadrados (Van Engelen et al. 2014).

Los modelos desarrollados por Spizzuoco et al. en 2014 para aisladores fibro reforzados de caucho reciclado (RR-FRB) se realizaron en el programa MSC. Marc. Para el refuerzo de fibra se empleó un elemento de barra, que es un material isotrópico elástico lineal con un módulo de Young de 14000 MPa y un espesor de 0,07 mm. El caucho se modeló como un material Mooney-Rivlin de un solo parámetro (también conocido como Neo-Hookean) con un módulo de corte de 0,7 MPa y un módulo volumétrico de 2000 MPa. El análisis bidimensional se realizó considerando deformación plana, utilizando elementos cuadriláteros isoparamétricos de cuatro nodos para modelar el caucho. Para lograr una representación precisa de las deformaciones en el elemento, se requirió una malla fina. La discretización en elementos finitos constó de 6790 elementos cuadrados de cuatro nodos, con una longitud de lado aproximada de 1 mm. Al comparar la rigidez vertical global de los aisladores, los resultados concuerdan con las soluciones analíticas dando diferencias máximas de 13.5%. En cuanto a las pruebas de compresión vertical, los RR-FRB los periodos de aislamiento son efectivos para la mitigación sísmica a estructuras a gran escala (Spizzuoco et al. 2014).

Para calibrar las propiedades mecánicas de un aislador sísmico en condiciones no adheridas, Habieb et al. en 2019 desarrollaron un detallado modelo 3D de elementos finitos utilizando el software Abaqus de Simulia en su versión 2014, se implementa un modelo UFREI completo pero simple en un elemento de usuario ABAQUS (UEL), teniendo en cuenta la no linealidad del material y su endurecimiento y comportamiento histerético del aislador. Además, se consideran múltiples grados de libertad para simular el complejo comportamiento 3D de las UFREI. El aislador estudiado consiste en almohadillas de goma fabricadas con neumáticos reciclados, y utiliza refuerzos de fibra de vidrio en lugar de láminas de acero para mejorar la rigidez vertical. Se empleó una refinada discretización con elementos de ladrillo de 8 nodos para representar las principales características geométricas y mecánicas del UEL. El aislador, denominado UFREI-100, tiene una sección cuadrada de 100 mm de lado y una altura de 52 mm. La malla utilizada para modelar las almohadillas de goma consta de elementos con dimensiones aproximadas de $7,6 \times 7,6 \times 1,6$ mm. Se utilizó el modelo de energía de deformación de Yeoh como modelo hiperelástico para las almohadillas de goma. Posteriormente, se realizó una simulación numérica aplicando un desplazamiento horizontal cíclico de 1 Hz y una presión vertical constante de 1,17 MPa sobre los modelos UEL y el modelo 3D de elementos finitos de la UFREI-100 (Habieb et al. 2019).

En cuanto a estudios de compresión, se ha establecido que es importante mantener una rigidez vertical adecuada para cumplir con los requisitos de un sistema de aislamiento (Van Engelen 2015; Habieb et al. 2019; Toopchi-Nezhad et al. 2011). Por lo tanto, el análisis tridimensional por elementos finitos de apoyos elastoméricos circulares reforzados con fibras reforzados con fibras (Osgooei et al. 2014), concluyó que el efecto de límite final, que a menudo no se tiene en cuenta para el diseño de un aislador, se convierte en un factor que contribuye a la respuesta vertical de los aisladores con refuerzos flexibles, o aisladores con valores de factor de forma bajos.

Finalmente, en 2017, Van Ngo et al. presentaron una evaluación de la rigidez horizontal de aisladores elastoméricos fibro reforzados (B-FREI) sometidos a presión vertical constante y desplazamiento horizontal cíclico. El estudio fue modelado en ANSYS v.14.0. El comportamiento hiperelástico del elastómero se representó utilizando el modelo de Ogden de tres términos. Se utilizó un elemento estructural sólido de ocho nodos con tres grados de

libertad. En el modelo, se incluyeron dos placas horizontales rígidas en la parte superior e inferior del aislador para representar la superestructura y los cimientos, respectivamente. Las cargas se aplicaron en la placa superior, que tenía movilidad en las direcciones vertical y horizontal, mientras que los nodos de la placa inferior estaban restringidos. Se empleó un mallado hexagonal y se realizó un estudio de sensibilidad de malla para lograr la convergencia de los resultados. En cuanto a los materiales, se modeló el elastómero con parámetros hiperelásticos y viscoelásticos. Se llevaron a cabo análisis tanto de B-FREI (aplicación adherida) como de U-FREI (aplicación no adherida) bajo desplazamiento horizontal cíclico, manteniendo una presión vertical constante de 5,6 MPa en la placa superior de acero del modelo simulado. Se realizaron tres ciclos sinusoidales completos con amplitudes de desplazamiento crecientes hasta 1,50 tr (135 mm). El rango de desplazamiento aplicado en el análisis de elementos finitos fue mayor que el considerado en la investigación experimental (Van Ngo, Dutta, and Sajal K Deb 2017).

El modelado en elementos finitos de RU-FREIs puede servir como una herramienta valiosa para finalizar el diseño preliminar y reducir los costos elevados de las repeticiones de prueba necesarias para lograr una optimización del aislador.

5.3 Marco Teórico

5.3.1 Aspectos generales

El aislamiento de base se define como una interfaz flexible o deslizante colocada entre una estructura y sus cimientos, con el fin de desacoplar los movimientos horizontales de la estructura, reduciendo así los daños causados por los terremotos a la estructura. Se han inventado muchos mecanismos de este tipo, y el caucho, por ejemplo, se ha utilizado como base de apoyo durante las últimas décadas. El caucho laminado es actualmente el sistema más utilizado debido a la resistencia vertical para soportar todo el peso del edificio (SREI) (Miura and Ikeda 2008).

Los aisladores generalmente se ubican entre soportes superiores e inferiores, ya sea adheridos o no adheridos. En una aplicación adherida, el aislador se conecta a dos placas de acero en los extremos, las cuales están sujetas mecánicamente a los soportes (Figura 1a). Por otro lado, los no adheridos, prescinden de las gruesas placas de acero en los extremos y el

aislador se coloca entre los soportes superior e inferior sin restricciones mecánicas (Figura 1b) (Van Engelen 2015), en la Figura 1 se puede observar dos tipos de aisladores, los aisladores elastoméricos con refuerzo de acero y los aisladores elastoméricos reforzados con fibra, figura 1a y figura 1b respectivamente.

Las características de aisladores no adheridos presentan la ventaja de eliminar las tensiones de tracción en el rodamiento, permitiendo que se deslice fuera de los soportes en caso de corte. Esto reduce los costosos y exigentes requisitos de unión que son comunes en los rodamientos convencionales. Además, estos aisladores tienen la capacidad de deformarse sin sufrir daños significativos frente a movimientos sísmicos de alta magnitud. Esto se debe a que los planos superior e inferior pueden separarse de las placas de soporte sin generar tensiones de tracción. Además, los momentos de desequilibrio son contrarrestados por la carga vertical, a través del desplazamiento de las fuerzas resultantes en dichas superficies (Calabrese et al, 2015).

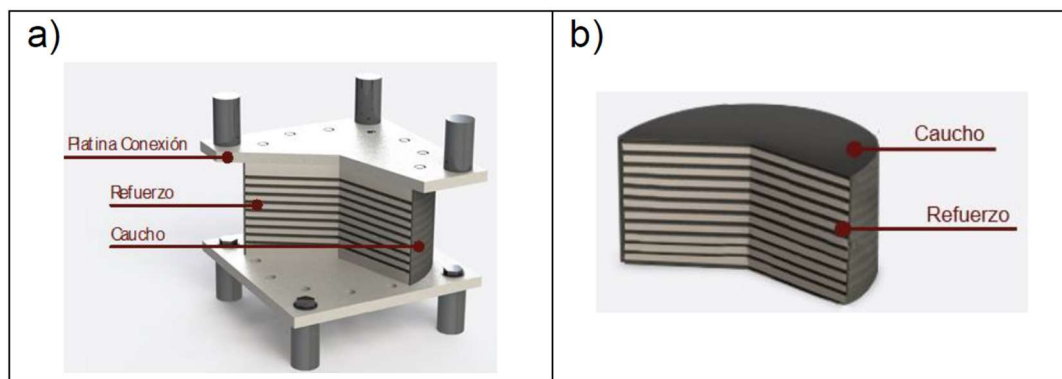


Figura 1. Tipos de aisladores elastoméricos a) SREI, y b) FREI. (I. E. Madera Sierra 2018)

En muchos casos, los sistemas de aislamiento son no lineales en cuanto a la relación fuerza-desplazamiento. Sin embargo, en el análisis de base aislada de la estructura, se utilizan modelos simples que tratan la superestructura como una estructura de un solo grado de libertad (SDOF). El aislador se modela como una combinación de resorte elástico y amortiguador viscoso, y la base deslizante se considera como superficies planas que siguen la ley de fricción estática. Al final del proceso de diseño, es importante tener en cuenta las propiedades no lineales de los aisladores y sus efectos (Chen and Scawthorn 2003).

Los aisladores sísmicos reforzados con fibra pueden tener una mayor resistencia a la tracción y una mayor rigidez. La fibra se utiliza para mejorar las propiedades mecánicas del material y para aumentar su capacidad de absorción de energía. Esto se logra mediante la incorporación de fibras de alta resistencia en la matriz del material, lo que aumenta su capacidad para soportar cargas sísmicas. Los aisladores deberán satisfacer las siguientes funciones (Molinares and Barbat 1994):

1. Desempeño bajo todas las cargas de servicio, verticales y horizontales; deberán ser efectivos como los apoyos estructurales convencionales.
2. Proporcionar flexibilidad horizontal para alcanzar el periodo natural objetivo para la estructura aislada.
3. Facultad de volver a centrar la estructura después del movimiento del suelo para que ningún desplazamiento horizontal residual pueda reducir la capacidad de servicio de la estructura.
4. Facilitar un nivel adecuado de disipación de energía o capacidad de amortiguamiento para controlar el desplazamiento que de otro modo podría dañar otros miembros estructurales.

El comportamiento de estos aisladores bajo cargas sísmicas es crítico para el desempeño general de la estructura. El método de los elementos finitos (FEM) es una técnica numérica utilizada para aproximar el comportamiento de las estructuras bajo diversas condiciones de carga, mediante un conjunto de elementos interconectados. El comportamiento de cada elemento se rige por la siguiente ecuación (1):

$$m\ddot{u}(t) + c\dot{u}(t) + ku(t) = f(t) \quad 1$$

Donde $u(t)$ es el desplazamiento del aislador en el momento t , m es la masa del aislador, c es el coeficiente de amortiguamiento (ecuación 3), k la rigidez del aislador (ecuación 2) y $f(t)$ es la fuerza externa (ecuación 1) que actúa sobre el aislador.

$$k = \frac{G \times A}{h} \quad 2$$

Donde G es el módulo de corte del material, A es el área de la sección transversal del aislador y H es la altura del aislador.

$$c = 2\zeta \times wn \times m \quad 3$$

Donde ζ es la relación de amortiguamiento y wn la frecuencia natural del aislador.

El diseño de un aislador sísmico se basa en la teoría de la mecánica de materiales y la dinámica estructural. En particular, los aisladores sísmicos utilizan principios de amortiguamiento y disipación de energía para reducir la respuesta sísmica de una estructura (Kelly and Konstantinidis 2011).

La rigidez vertical por su parte se refiere a la capacidad del aislador para resistir cargas verticales y mantener la estabilidad de la estructura. Esta rigidez vertical es crucial para evitar el hundimiento excesivo o la compresión del aislador bajo cargas verticales.

El comportamiento vertical del aislador se caracteriza a partir de la rigidez vertical Kv , bajo carga vertical P , la frecuencia vertical teórica fv se calcula mediante la 4 donde g es la aceleración de la gravedad.

$$fv = \frac{1}{2} \pi \sqrt{\frac{Kv g}{P}} \quad 4$$

Por otro lado, la rigidez horizontal (ecuación 5), se refiere a la capacidad del aislador para resistir las fuerzas horizontales generadas por eventos sísmicos. Esta rigidez horizontal permite que el aislador absorba y disipe la energía del terremoto, reduciendo así las deformaciones y las tensiones transmitidas a la estructura.

Una de las propuestas para estimar la rigidez de los FREIs circulares desconectados considera el cálculo de la rigidez horizontal de la siguiente manera (I. E. Madera Sierra 2018):

$$K_H = \frac{G_{eff} A_{eff}}{tr} \quad 5$$

El método se puede dividir en cuatro pasos:

1. El módulo de corte efectivo (G_{eff}) se obtiene de la curva de caracterización del caucho para niveles de deformación esperados.

2. La altura del aislador comprimido (h), definida como $h=H-u_{th}$, es estimada analíticamente, donde este valor se obtiene de ensayos de compresión. Para esto, fue derivada una expresión que considera el desplazamiento vertical teórico bajo la carga de diseño (uth) (ecuación 6), como la suma del desplazamiento del caucho inconfinado (ur) y el desplazamiento del caucho confinado (urf).

$$u_{th} = u_r + u_{rf} \quad 6$$

La primera parte, ur , es calculada como el producto de la altura inicial H y la deformación unitaria, ε , en el punto límite de cambio de rigidez ($ur=H\varepsilon$). Esta deformación ε es obtenida del resultado del ensayo de compresión del caucho puro. La segunda parte, urf , es calculada usando la expresión $urf=\Delta P/KVd$, donde ΔP es la máxima carga aplicada (P) menos la carga en el límite de cambio de rigidez (Psc); la rigidez dinámica vertical teórica KVd (ecuación 7) es obtenida con la siguiente ecuación.

$$K_{vd} = \frac{E_c^f A}{Hr} \quad 7$$

donde E_c^f es el módulo de compresión en el caso de tener reforzamiento flexible.

El valor de E_c , que se calcula para una sola capa de caucho, está controlado por el factor de forma S (ecuación 8), definido como:

$$S = \frac{\text{Área cargada}}{\text{Área libre de fuerza}} \quad 8$$

para aisladores circulares el factor de forma (FS) es $S=D/(4tr)$, con D como el diámetro del dispositivo y tr el espesor de cada capa de caucho.

3. Posteriormente, es calculada el área efectiva de acuerdo con el nivel de deformación. Para este propósito, el método de Russo et al. fue modificado para ser aplicado a un aislador circular. Como resultado, la porción del aislador en contacto con los soportes y sujeto a cortante puro ($Aeff$) (ecuación 9) será igual al área total (A) menos el área del semicírculo desprendido (Ad).

$$A_{eff} = A \text{ for } d \leq d_0$$

$$A_{eff} = A - A_d \text{ for } d > d_0$$

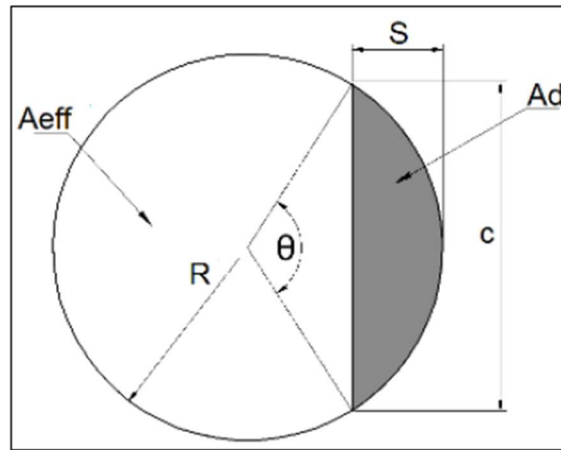


Figura 2 Área efectiva para aisladores circulares (A_{eff}) (I. E. Madera Sierra 2018).

4. Finalmente, KH es calculada para diferentes niveles de deformación con las funciones obtenidas de G_{eff} y A_{eff} .

Para los ajustes de los modelos se evaluarán dos propiedades principales: la rigidez efectiva (K_{eff}) 10) y la relación de amortiguamiento (β) 11) (Cilento, Losanno, and Piga 2022b; Saremi and Toopchi-Nezhad 2021b), que se utilizan para caracterizar el comportamiento dinámico del aislador. La rigidez efectiva relaciona las amplitudes de desplazamiento lateral máxima y mínima (U_{max} , U_{min}) con las correspondientes fuerzas cortantes máxima y mínima (F_{max} , F_{min}) experimentadas por el aislador durante el ciclo de carga de interés.

$$K_{eff} = \frac{F_{max} - F_{min}}{U_{max} - U_{min}} \quad 10$$

El amortiguamiento viscoso equivalente depende de la energía disipada, W_d , (área del ciclo de histéresis) y de la energía almacenada, W_s , (12) cuanto mayor sea la disipación de energía, mayor será el amortiguamiento, aquí Δ_{max} son los desplazamientos máximos y mínimos del prototipo correspondientes a los niveles de respuesta utilizados para determinar las características mecánicas del sistema.

$$\beta = \frac{W_d}{4\pi W_s} \quad 11$$

Donde,

$$W_s = \frac{K_{eff}\Delta_{max}}{2} \quad 12$$

5.3.2 Modelación de elementos finitos

El método de elementos finitos (FEM) es una técnica de análisis que consiste en la discretización de un elemento en nodos conectados, de manera que se mantiene la compatibilidad parcial o total entre las interfaces de los elementos. Los desplazamientos nodales se determinan utilizando principios de variación de energía o métodos de equilibrio. Los elementos finitos pueden adoptar diferentes formas geométricas, como cuadrados, triángulos, prismas, tetraedros, dependiendo de la geometría del problema en cuestión (Petrosian and Ambartsumian 2020).

La descomposición del medio en elementos finitos reemplaza un sistema con un número infinito de grados de libertad por un sistema con un número finito. Los desplazamientos de los nodos al final del elemento se consideran como incógnitas, y la función que describe los desplazamientos dentro de los elementos finitos se expresa mediante los desplazamientos en cada punto nodal. A partir de estos nodos, es posible determinar las deformaciones y tensiones en los límites del elemento final (Petrosian and Ambartsumian 2020). Las incógnitas de cada elemento también se denominan grados de libertad, las matrices globales se resuelven para los desplazamientos desconocidos, dadas las fuerzas y condiciones de contorno. A partir de los desplazamientos en los nodos se calculan las deformaciones y tensiones de cada elemento (Kim and Sankar 2008).

En general, los procedimientos de análisis de elementos finitos pueden dividirse en cuatro etapas: análisis preliminar, preproceso, solución de ecuaciones y postproceso. En muchos casos, es posible que no se pueda obtener una solución satisfactoria a partir de un único análisis, por tanto, es necesario repetir procedimientos y perfeccionar el modelo hasta que la solución converja. En la figura 3 se muestra dicho procedimiento.

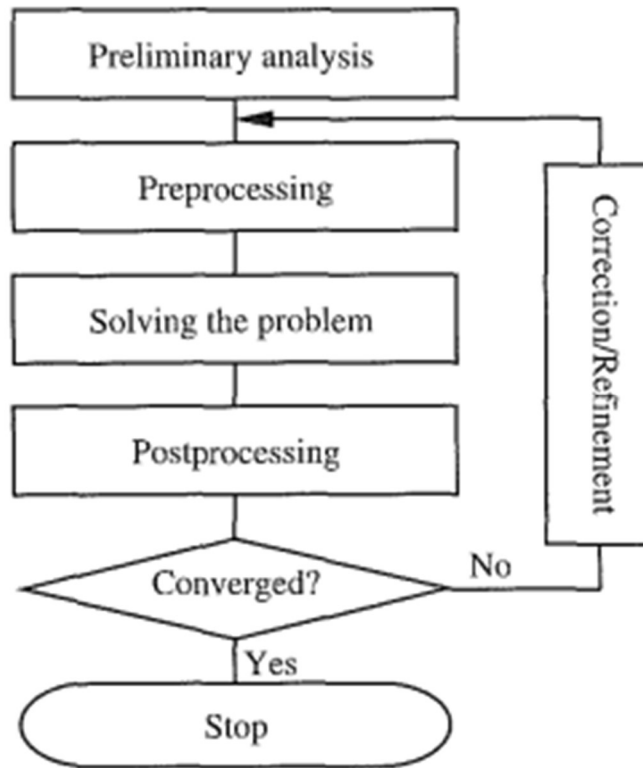


Figura 3. Procedimiento de análisis por elementos finitos. (Kim and Sankar 2008)

Para modelar un elastómero en un programa de elementos finitos, se necesitan las siguientes entradas (Dassault Systèmes Simulia 2012):

- **Modelo de material:** Abaqus ofrece varios modelos de materiales elastoméricos, como el modelo hiperelástico Mooney-Rivlin, el modelo de Ogden y el modelo de Yeoh.
- **Parámetros del material:** se deben proporcionar los parámetros del material para el modelo seleccionado. Estos parámetros pueden incluir la densidad del material, el módulo de Young, el coeficiente de Poisson, los coeficientes de rigidez del material y los coeficientes de deformación, en el caso del refuerzo del aislador se puede asignar la rigidez y el módulo de Young para la fibra. En el caso del caucho reciclado Abaqus ofrece varios modelos para hiperelásticos y viscoelásticos que se pueden utilizar. El modelo hiperelástico de Ogden se basa en tres parámetros de material, y su formulación permite ajustar la respuesta del material a diferentes niveles de

deformación, del mismo modo el modelo hiperelástico de Yeoh es una extensión del modelo de Mooney-Rivlin y se utiliza comúnmente para describir materiales elastoméricos y se basa en tres constantes de material, C10, C20 y C30.

Por otro lado, el modelo viscoelástico de Maxwell se utiliza para describir materiales, que muestran tanto comportamiento elástico como viscoso, este se basa en dos constantes de material, el módulo de elasticidad y la constante de relajación viscosa.

- **Geometría del modelo:** se debe definir la geometría del modelo, incluyendo la forma y las dimensiones del aislador.
- **Condiciones de frontera:** se deben especificar las condiciones de frontera en el modelo, incluyendo las restricciones de movimiento y las cargas aplicadas.
- **Malla:** se debe generar una malla adecuada para el modelo, que debe ser lo suficientemente fina para capturar las características de deformación y esfuerzo.

Una vez que se han proporcionado todas las entradas necesarias, se puede ejecutar la simulación y analizar los resultados para evaluar el comportamiento del elastómero bajo diferentes cargas y condiciones de operación (ver figura 4).

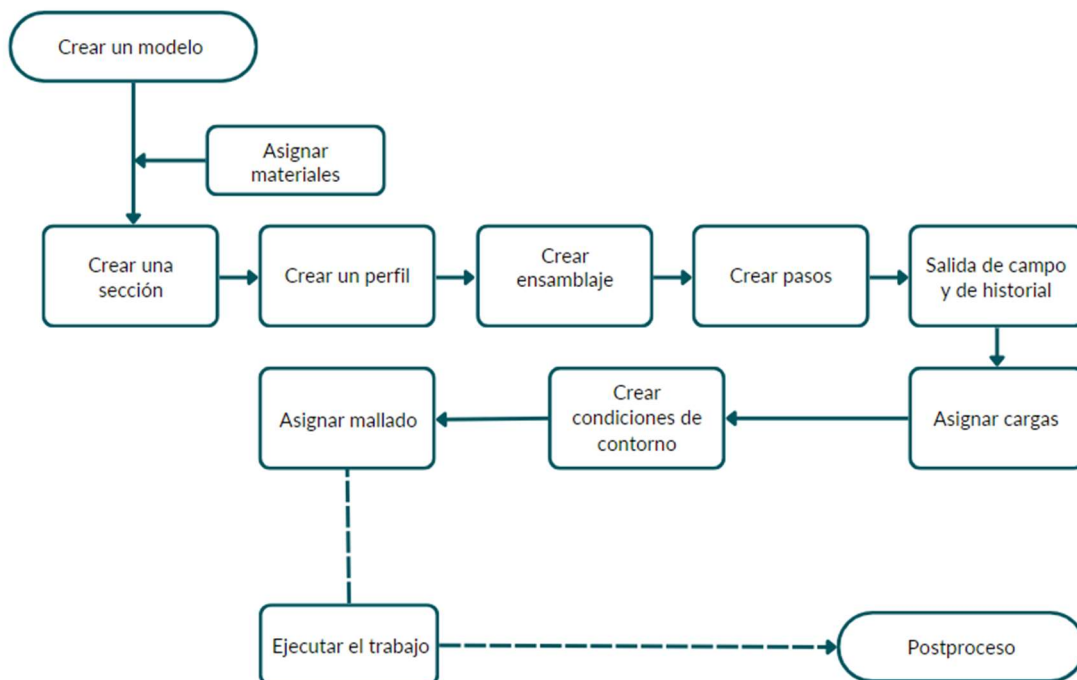


Figura 4. Esquema de modelación por elementos finitos para un aislador sísmico (Fuente: elaboración propia).

6. MODELO DE ELEMENTOS FINITOS

El análisis del aislador sísmico de caucho reciclado reforzado con fibra (RU-FREI) se realizó mediante el Método de los Elementos Finitos (MEF), empleando el software ANSYS Workbench 2023 R2. Se desarrollaron dos modelos numéricos para simular el comportamiento del aislador bajo condiciones de compresión cíclica y corte.

La validación del modelo se llevó a cabo mediante un análisis comparativo entre los resultados numéricos y los datos experimentales disponibles. Una vez calibrado el modelo base, se realizó un estudio paramétrico considerando diversas variaciones geométricas y materiales para garantizar la confiabilidad y precisión de los resultados obtenidos.

Se resalta que se inició modelando el aislador (caucho y fibra) como elementos sólidos, pero se incrementaba el número de elementos en el modelo, los pasos se tuvieron que modelar en muchas partes y el tiempo de modelación era de más de 24 horas, por lo cual el modelo se mejoró y se modeló de acuerdo al capítulo 6.3.

6.1 Geometría del prototipo

Se utilizó la geometría propuesta por Daniele Losanno et al. 2019b, que resultó del diseño de dispositivos aisladores sísmicos para las pruebas experimentales en la mesa sísmica del Departamento de Estructuras para Ingeniería y Arquitectura (DiSt) de la Universidad de Nápoles Federico II en Italia. El proceso de diseño se realizó de acuerdo con los requisitos de la FEMA 450, siguiendo las formulaciones proporcionadas para SREIs y considerando el nivel de amenaza sísmica del lugar. La estructura prototipo constó de un marco de acero con dos grados de libertad, con una altura total de 2900 mm y dimensiones en planta de 2650 mm × 2150 mm. El peso total de la estructura fue de 77 kN, con una carga en el nivel base de 36 kN y en el nivel superior de 41 kN, lo que resultó en una carga de 19.25 kN en la base de cada columna. Para el diseño del modelo a escala, se aplicaron factores de reducción donde $SL = 1/3$ representa la reducción de las dimensiones lineales y $SM = 1/9$ la reducción de la masa con respecto a una estructura real. Sin embargo, las propiedades de los materiales utilizados en los aisladores (goma, acero, fibras) fueron equivalentes a las que se utilizarían en una estructura a escala real ($SE = 1$) (I. E. Madera Sierra 2018) (Daniele Losanno et al. 2019b).

A partir de esto, la geometría del prototipo RU-FREI contó con un diámetro $d = 75$ mm y una altura total $H_T = 44$ mm. Estos prototipos incorporaron capas de refuerzo de fibra, intercaladas con capas de caucho, concretamente $n_r = 15$ capas de caucho y $n_f = 14$ capas de fibra (Figura 5). El caucho tiene un espesor $t_r = 2$ mm, la fibra $t_f = 1$ mm y el acero $t_s = 5$ mm.

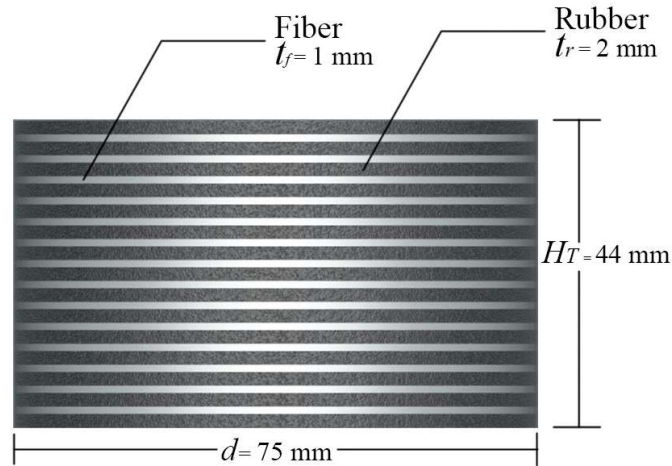


Figura 5. Geometría del prototipo

6.2 Materiales

La simulación precisa del comportamiento de los aisladores sísmicos requirió modelos constitutivos adecuados para el caucho, debido a sus propiedades de gran deformación e incompresibilidad. Para representar correctamente los ciclos de histéresis en el desplazamiento lateral bajo carga, se implementó una estrategia de modelado en dos partes. En primer lugar, se empleó un modelo de material hiperelástico que excluyó los efectos temporales del análisis. Sin embargo, para capturar adecuadamente la respuesta dinámica de los aisladores de elastómero reforzado con fibra en configuración no adherida (U-FREI), simular los ciclos de histéresis y evaluar la disipación de energía durante cada ciclo de carga, fue necesario complementar este modelo con un componente viscoelástico (Rodríguez et al. 2024).

El modelo de Bergstrom-Boyce (BB) fue seleccionado para caracterizar el comportamiento viscoelástico no lineal del caucho. Este modelo utilizó parámetros obtenidos mediante calibración directa con resultados experimentales de diversos ensayos (compresión, corte, tensión, fluencia y relajación) realizados en muestras de caucho puro. En la

implementación del modelo, se incorporaron tanto las propiedades hiperelásticas (Tabla 3) como viscoelásticas (Tabla 4) del material.

El modelo utiliza los siguientes parámetros de material:

Tabla 2. Parámetros modelo Bergstrom-Boyce (BB)

Nombre del parámetro	Descripción
μ_0	Módulo de corte de la red A
N_0	Estiramiento límite de las cadenas de la red A
μ_1	Módulo de corte de la Red B
N_1	Estiramiento límite de las cadenas de la red B
D	Termino volumétrico (inverso del módulo volumétrico)
fac	Prefactor para la tasa de flujo de la red B
C	Exponente de potencia para la dependencia del flujo con la deformación en la red B
m	Exponente de potencia para la dependencia del flujo con el esfuerzo (en la Red B)

Tabla 3. Parámetros hiperelásticos del caucho (Rodriguez et al. 2024).

μ_0	1.030 MPa
N_0	4,619
μ_1	4.546 MPa
N_1	0.820
D	0.197 MPa-1

Tabla 4. Parámetros viscoelásticos del caucho (Rodriguez et al. 2024).

fac	1.142 MPa/s
C	-1.682
m	12.620

En cuanto a la fibra, el cual es un refuerzo delgado y flexible, se estudiaron tres tipos; fibra de poliéster (*PL*), malla de fibra de vidrio con resina epóxica (*FVE*) y fibra de alto módulo HR220 (*HRA*) dado que uno de los objetivos fue seleccionar un sistema de refuerzo que reduzca el costo y mejore las características mecánicas del aislador.

Cabe destacar que el modelo a validar trabajó con fibra de poliéster (PL). La fibra de poliéster es un elemento bidireccional con propiedades ortotrópicas mostradas en la Tabla 5 (I. Madera Sierra 2018).

Tabla 5. Propiedades Ortotrópicas del refuerzo de fibra de polyester del prototipo (I. Madera Sierra 2018).

Módulo de Young en la dirección X [MPa]	1176
Módulo de Young en la dirección Y [MPa]	1176
Módulo de Young en la dirección Z [MPa]	617
Relación de Poisson XY	0.13
Relación de Poisson YZ	0.13
Relación de Poisson XZ	0.3
Relación de Poisson XY [MPa]	452.31
Relación de Poisson YZ [MPa]	520.35
Relación de Poisson XZ [MPa]	520.35

El acero es un material ajeno al conjunto caucho-fibra (aislador), se utilizó exclusivamente para poder simular en el FEM las placas de aplicación de las cargas en un ensayo experimental.

El acero se modeló como un material elástico isotrópico lineal con módulo de Young $E = 210000$ MPa, relación de Poisson $\nu = 0.3$ (I. Madera Sierra 2018). Se utilizó una característica rígida en el modelo para evitar deformaciones en sus bordes.

6.3 Definición del modelo

El caucho reciclado se modeló como un elemento simple (cilindro) y la fibra se modeló como una superficie intermedia (midsurface) considerando su espesor. Las placas de acero se modelaron como elementos sólidos situados en los extremos del aislador y elementos de contacto superficie a superficie para definir las interacciones entre el caucho y las placas de acero con un coeficiente de fricción de 0,6 para evitar el deslizamiento (Ahmad Basshofi Habieb 2020; I. Madera Sierra 2018).

El desplazamiento en la placa de acero inferior se restringió en todas las direcciones ($u_x=u_y=u_z=0$) para simular las condiciones de apoyo fijo (Figura 6). Para el mallado se

utilizó una malla mecánica no lineal, el orden de los elementos fue lineal y el tamaño de los elementos fue de 5,5 mm. Se utilizó un total de 6963 nodos y 5208 elementos (Figura 7).

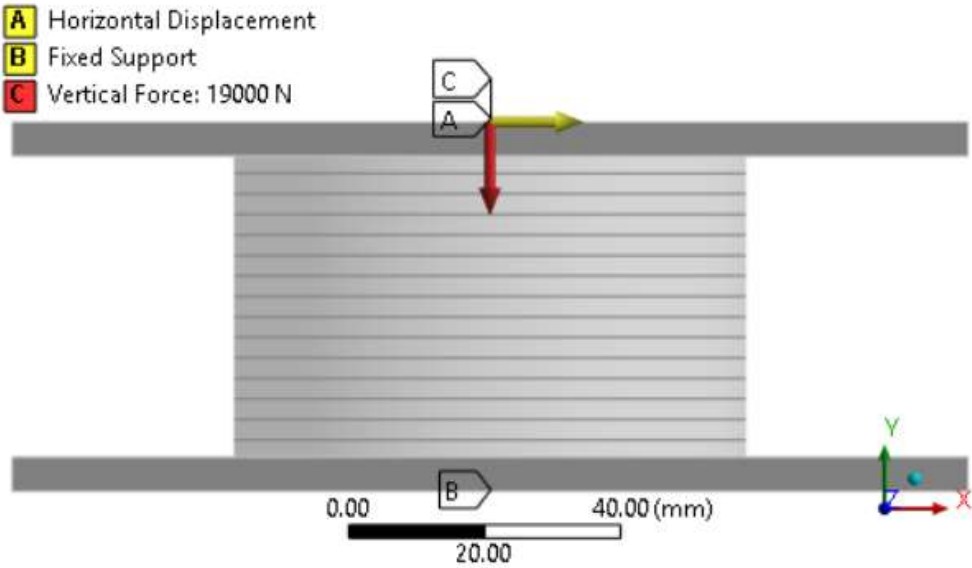


Figura 6. Condiciones de borde

En los controles de solución se activó (On) la opción de grandes deflexiones, permitiendo grandes deflexiones en el análisis. En los controles no lineales la opción Newton-Raphson fue de tipo Unsymmetric para resolver las ecuaciones, esto garantiza un menor coste computacional por iteración al no factorizar la matriz de rigidez completa.

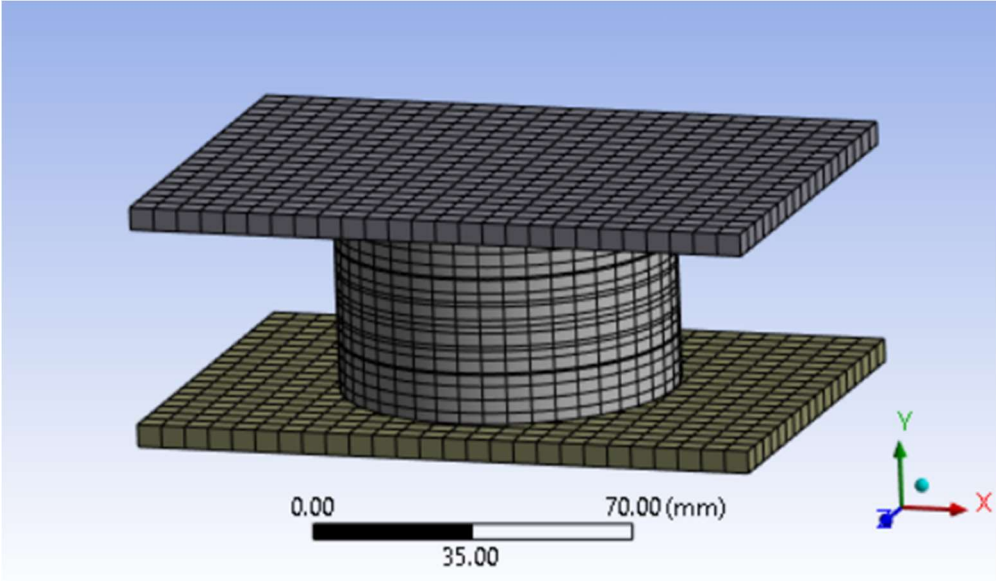


Figura 7. Malla sobre el prototipo

6.4 Carga

Se modelaron dos ensayos: compresión cíclica y cortante con el fin de determinar las propiedades verticales y horizontales.

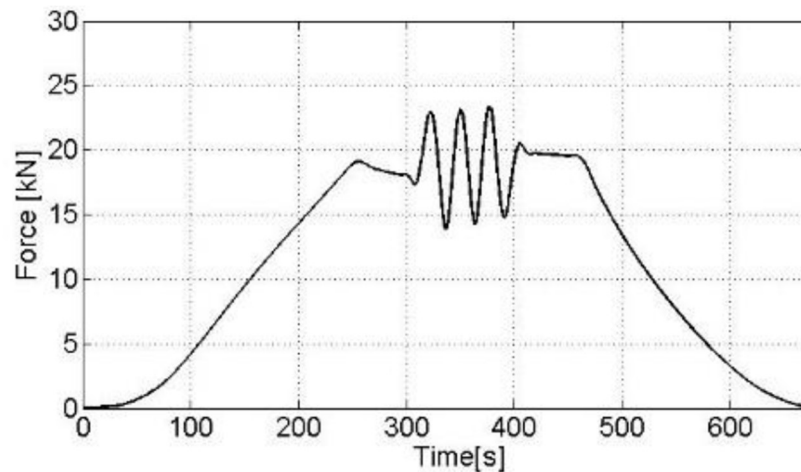
6.4.1 Compresión cíclica:

Este ensayo se realizó en los laboratorios de estructuras de la Pontificia Universidad Javeriana Bogotá en Colombia. El ensayo consistió en que en cargar las probetas de forma monótona (velocidad de carga de 0.01 mm/s) hasta la carga de diseño $P = 19$ kN.

Luego se aplicaron 3 ciclos consecutivos con una variación de $\pm 30\%$ respecto a la carga de diseño. Finalmente, las probetas se descargan monotónicamente a la misma velocidad de carga (Figura 8) (Daniele Losanno et al. 2019c). En el modelo de FEM esta carga se aplica en la placa superior de acero.



(a)



(b)

Figura 8. (a) Montaje experimental, (b) Protocolo de carga/desplazamiento en el ensayo de compresión cíclica.

6.4.2 Cortante

Este ensayo se realizó en el Laboratorio de Sistemas de Infraestructuras Inteligentes de la Universidad de Purdue en Estados Unidos. En este ensayo las probetas se sometieron a cargas combinadas de corte y compresión. La presión vertical se aplica de manera constante

en la placa superior de acero en la dirección vertical $P = 19 \text{ kN}$ mientras que en la dirección horizontal se aplica desplazamientos laterales sinusoidales con un periodo de diseño $T_D = 1.15 \text{ s}$ y desplazamiento máximo $D_M = 29 \text{ mm}$.

Los niveles de deformación se dividen en tres partes: i) tres ciclos en cada incremento ($0.25D_M$, $0.50D_M$, $0.67D_M$, $1.00D_M$); ii) tres ciclos al desplazamiento máximo total ($1.00D_M$); y iii) diez ciclos continuos a 0.75 el desplazamiento máximo total ($0.75D_M$) (Figura 9) (Daniele Losanno et al. 2019c). En el modelo FEM la carga vertical constante (paso 1) se aplica en la placa superior de acero y el desplazamiento sinusoidal (paso 2) se aplica en la misma parte.

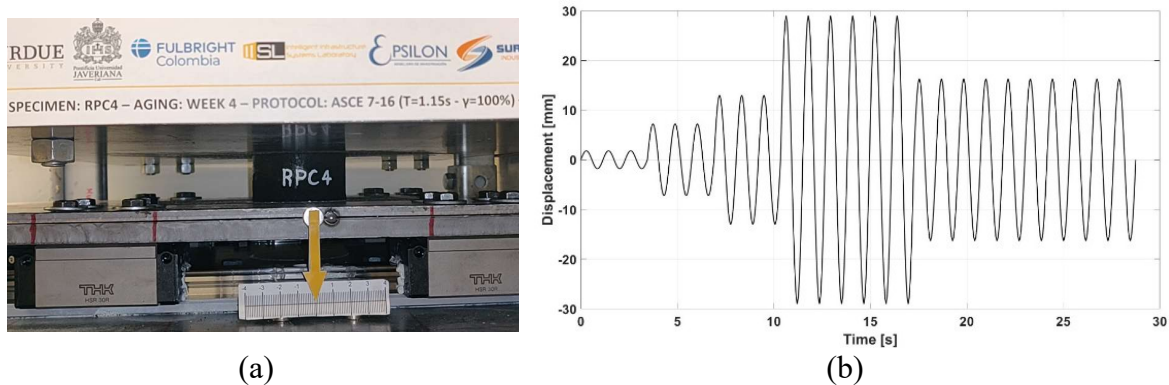


Figura 9. (a) Montaje experimental, (b) Protocolo de carga/desplazamiento en el ensayo de corte

La Figura 9 muestra los ciclos de desplazamiento vs tiempo que se aplicaron en el modelo y experimentalmente. Los aisladores elastoméricos exhibieron mayor rigidez y capacidad de disipación de energía en el primer ciclo de desplazamientos laterales de igual amplitud, fenómeno conocido como efecto Mullins. Este efecto es un comportamiento característico de los materiales elastoméricos, particularmente del caucho, que se manifiesta como un ablandamiento o reducción de la rigidez después del primer ciclo de carga, independientemente del tipo de tensión o deformación aplicada. Tras algunos ciclos iniciales, el prototipo experimentó desgaste, convergiendo sus propiedades mecánicas hacia valores más estables (Saremi and Toopchi-Nezhad 2021c).

Dado este contexto, para fines de ajuste, únicamente se incorporan los bucles correspondientes al tercer ciclo de cada amplitud de desplazamiento. Esto se debe a que los modelos hiperelásticos no son capaces de simular el efecto Mullins. Esta elección no solo simplifica la calibración del modelo, sino que también acelera significativamente el proceso.

6.5 Ajuste FEM

En la fase inicial, se emplearon los coeficientes constitutivos del caucho puro para el modelo numérico. Sin embargo, debido a la naturaleza compuesta del aislador (caucho y fibra), fue necesario realizar un proceso de calibración para ajustar el modelo a los resultados experimentales. Este proceso implicó la optimización de los coeficientes del modelo Bergstrom-Boyce para representar adecuadamente el comportamiento mecánico del prototipo.

La calibración se llevó a cabo mediante el software MCalibration, utilizando un método iterativo de optimización para los coeficientes del caucho reciclado. El proceso se realizó hasta alcanzar un alto nivel de confianza estadística, logrando que los parámetros de rigidez y amortiguamiento efectivos del modelo numérico presentaran una desviación mínima respecto a los datos experimentales.

Dado que el aislador varía su comportamiento a lo largo de los ciclos de carga debido a su composición de caucho y fibra, afectada por factores como movimientos menores, desgaste y reorganización de partículas. Inicialmente, la calibración capturaba satisfactoriamente los primeros ciclos de deformación entre el 25% y el 67% del desplazamiento máximo. Sin embargo, en deformaciones del 100%, se observaban desprendimientos y daños en el caucho, lo que evidenciaba fallos bajo grandes deformaciones laterales. Posteriormente, al evaluar ciclos del 75%, el comportamiento del aislador dejó de ser estable, mostrando una degradación progresiva.

Para abordar esta limitación, se implementó una calibración en fases, lo que permitió reducir el error entre simulaciones y ensayos reales. La estrategia consistió en dividir el modelo en tres etapas de deformación, asignando coeficientes específicos a cada una:

- Fase 1: Deformaciones del 25%, 50% y 67%.
- Fase 2: Deformación del 100%.
- Fase 3: Deformación del 75%

Este enfoque mejoró significativamente la estabilidad y precisión del modelo, permitiendo una representación más fiel del comportamiento del aislador, logrando reducir los márgenes de error en compresión entre el 2% y 10%, y en corte errores entre el 3% y 18%. La Tabla 6 muestra los coeficientes de compresión cíclica y la Tabla 7 los coeficientes de corte ajustados.

Estos coeficientes (Tabla 6) solo se usaron para el modelo de compresión, en el modelo de corte se usaron solo los coeficientes de la Tabla 7 debido a que no se pudo usar coeficientes diferentes para cada paso del modelo, por lo cual se calibró los modelos de manera separada.

Tabla 6. Coeficientes del modelo de Bergstrom-Boyce (BB) para el aislador en compresión (Rodriguez et al. 2024).

Coeficientes	Precarga	Ciclos y descarga
μ_0 [MPa]	1.4	5.5
N_0	30.3	55
μ_1 [MPa]	60	30
N_1	30.3	30
F_{ac}	1.4	1.434
C	-1.9	-1.225
m	12	19.19
D [MPa⁻¹]	0.1	0.102

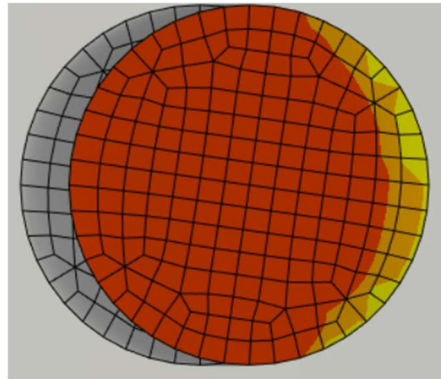
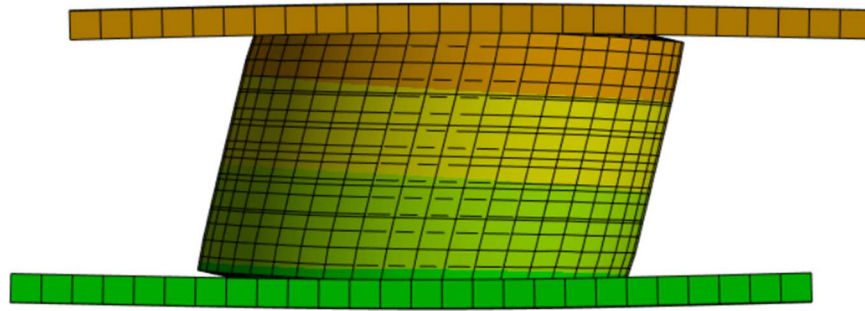
Tabla 7. Coeficientes del modelo de Bergstrom-Boyce (BB) para el aislador en corte (Rodriguez et al. 2024).

Coeficientes	Corte cíclico (25%,50%,67%)	Corte cíclico (100%)	Corte cíclico (75%)
μ_0 [MPa]	3.737	2.522	3.080
N_0	18.565	14.830	15.444
μ_1 [MPa]	5.259	24.097	27.519
N_1	18.565	14.830	15.444
F_{ac}	1.286	0.756	0.892
C	-5.025	-1.998	-6.650
m	36.690	30.804	31.019
D [MPa ⁻¹]	0.001	0.003	0.002

En cada ciclo de ensayo se evaluaron dos propiedades principales del aislador: la rigidez efectiva (K_{eff}) 10 y la relación de amortiguamiento (β) 11 (Cilento, Losanno, y Piga 2022b; Saremi y Toopchi-Nezhad 2021c).

El inicio del vuelco del prototipo se identificó al alcanzar aproximadamente un 25% de deformación lateral, tanto en el modelo numérico como en el ensayo experimental (Figura 10). En la simulación por elementos finitos, esto se evidenció mediante la inclinación del núcleo y la pérdida de contacto uniforme entre las superficies, lo que indicó el comienzo de una inestabilidad geométrica. Este comportamiento coincidió con lo observado durante el experimento, lo que respaldó la precisión del modelo desarrollado.

En ambos casos, tanto en el modelo FEM como en el montaje experimental mostrados en la Figura 11, se produce el efecto de vuelco esperado al 100% de la deformación máxima. Sin embargo, en el montaje experimental, el desgaste progresivo del caucho introduce errores significativos en los desplazamientos debido a la degradación no uniforme del material, mientras que las curvas de histéresis experimentan distorsiones caracterizadas por menor disipación de energía y asimetrías que el modelo FEM no captura al representar un comportamiento idealizado con propiedades constantes.

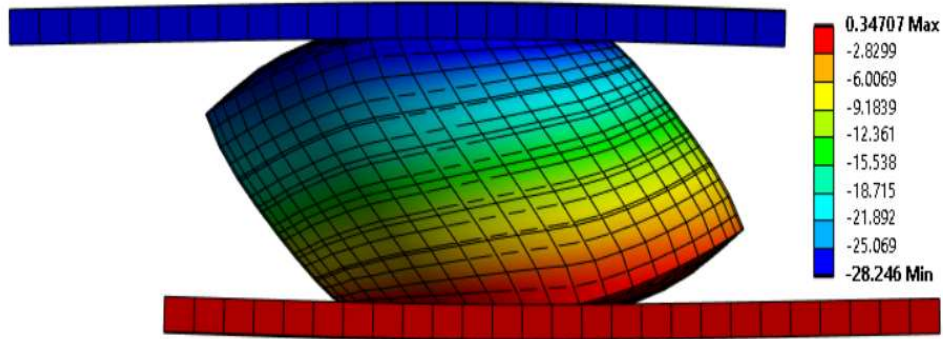


(a)



(b)

Figura 10. Campo de desplazamiento en la dirección de la carga lateral para $0.25D_M$. (a) Modelo FEM, (b) Montaje experimental.



(a)



(b)

Figura 11. Campo de desplazamiento en la dirección de la carga lateral para $1.00D_M$. (a) Modelo FEM, (b) Montaje experimental.

6.6 Validación del modelo

Los resultados experimentales de la compresión cíclica (Figura 12) permiten caracterizar el comportamiento vertical del aislador, a partir de la rigidez vertical K_v .

Tabla 8. Resultados del ensayo de compresión del prototipo de caucho reciclado con refuerzo de fibra de poliéster.

Prototipo	K_v [kN/mm]			K_{v_avg} [kN/mm]	K_{vth} [kN/mm]	T_v [s]	f_v [Hz]
	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3				
Experimental	15.86	15.98	16.09	15.98	25.22	0.069	14.45
FEM	13.28	14.91	14.74	14.31		0.073	13.68
Error	19%	7%	9%	12%			

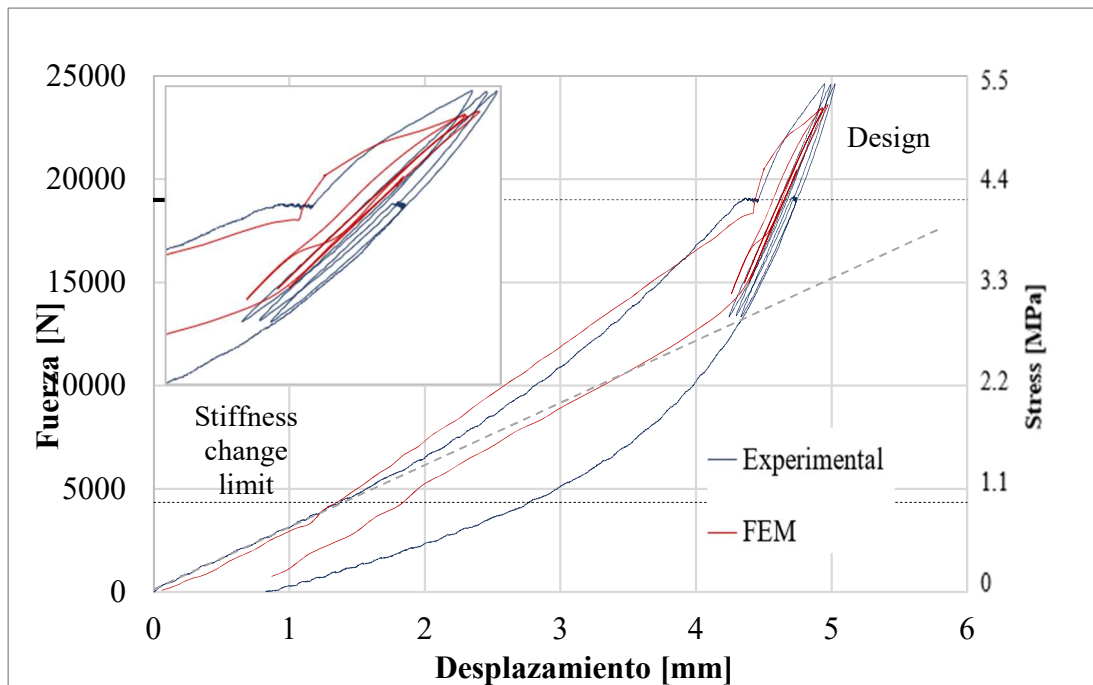


Figura 12. Curvas fuerza-desplazamiento durante un ensayo de compresión para el prototipo de caucho reciclado con refuerzo de fibra de poliéster.

Se observa que la frecuencia vertical experimental ($K_v \text{ exp}$) de 14,45 Hz y la obtenida por el modelo de elementos finitos de 13,68 Hz permanecen relativamente constantes, con un valor aproximado de 14 Hz. Este valor es unas 7 veces superior a la frecuencia típica del modo horizontal predominante en estructuras sísmicamente aisladas, que suele ser inferior a 2 Hz (Castillo Ruano and Strauss 2018). Por tanto, con relación al comportamiento vertical, se verificó que los aisladores son adecuados para proporcionar aislamiento sísmico, ya que permiten desacoplar los modos vertical y horizontal.

En esta situación, la diferencia entre los resultados experimentales ($K_v \text{ exp}$) y los del modelo MEF ($K_v \text{ FEM}$) para el prototipo de caucho reciclado con refuerzo de fibra de poliéster es de aproximadamente el 10%, lo cual sugiere que el modelo MEF representa adecuadamente el comportamiento real del prototipo, validando la metodología de simulación utilizada e indica que el modelo puede utilizarse con confianza para predecir el comportamiento del material en condiciones similares. Mientras que entre el modelo calibrado y la rigidez vertical teórica K_{vth} calculada mediante la 7, la diferencia es de aproximadamente el 49% (Tabla 8), indicando que en este caso en particular, el parámetro que afectó directamente el resultado teórico fue el módulo de corte del caucho al 20% de

deformación, por lo que se deberá realizar ensayos adicionales para confirmar el valor del material.

En cuanto a los resultados de corte la histéresis (Figura 13) proporcionan una estimación de la rigidez horizontal y el amortiguamiento. Los coeficientes de amortiguamiento experimentales varían entre el 11% y el 25% (Tabla 9), lo que podría atribuirse a una profunda interacción entre los refuerzos de fibra y las capas de caucho reciclado en los aisladores propuestos. Esta interacción hace que los valores de amortiguación de los aisladores sean superiores al 10%, valor considerado típico (Van Ngo, Dutta, and Sajal K. Deb 2017).

Cabe destacar que la rigidez lateral efectiva de los prototipos (Tabla 9) es significativamente inferior a la rigidez vertical (Tabla 8). Esto asegura que los modos de vibración de balanceo no influirán en la respuesta sísmica de la estructura base aislada.

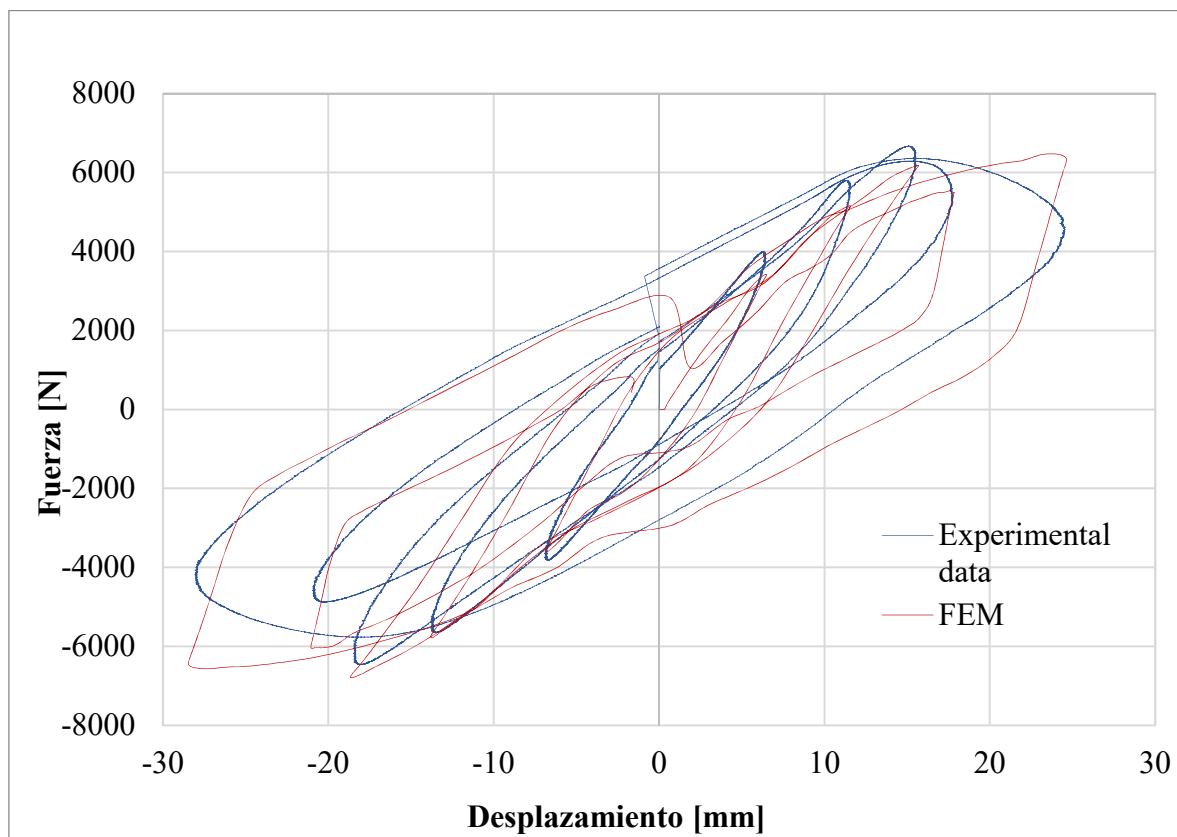


Figura 13. Curvas fuerza-desplazamiento durante un ensayo de corte para el prototipo de caucho reciclado con refuerzo de fibra de poliéster.

Tabla 9. Rigidez horizontal y amortiguamiento para $\gamma_s=25\%$, 50% , 67% , 100% , 100% and 75% .

% D_M	$\gamma_s=25\%$		$\gamma_s=50\%$		$\gamma_s=67\%$		$\gamma_s=100\%$		$\gamma_s=75\%$	
	KH [N/mm]	β [%]	KH [N/mm]	β [%]	KH [N/mm]	β [%]	KH [N/mm]	β [%]	KH [N/mm]	β [%]
Experimental	580.28	11.43	450.51	12.29	385.24	12.89	230.25	26.32	287.96	18.28
FEM	522.91	12.25	431.16	13.11	377.55	12.55	245.631	24.88	297.83	14.97
Error	10%	7%	4%	7%	2%	3%	7%	5%	3%	18%

El modelo de elementos finitos fue verificado con los resultados experimentales del prototipo de caucho reciclado con refuerzo de fibra de poliéster, obteniéndose una buena precisión (Tabla 8 y Tabla 9). A partir de dicha calibración, se definieron los parámetros que sirvieron como base para analizar el comportamiento de configuraciones alternativas mediante simulación. Este modelo ajustado se empleó para evaluar variaciones geométricas y de refuerzo en distintos prototipos, lo cual se mostrará en los siguientes capítulos.

7. ANALISIS DE LOS EFECTOS DEL CAMBIO DE FACTOR DE FORMA

Para comprender el comportamiento mecánico de los aisladores elastoméricos reforzados con fibra y evaluar el impacto de parámetros relevantes en su función como dispositivos de aislamiento de base, se llevaron a cabo análisis numéricos que replicaron las condiciones de las pruebas mecánicas de los prototipos. Análisis previos se centraron en parámetros como el factor de forma primario (S_1), la relación de aspecto (A), la compresión vertical (P), la orientación del refuerzo en el comportamiento general de estos aisladores elastoméricos y la combinación de algunos de estos parámetros (Ruano and Strauss 2021).

En este estudio, se exploraron combinaciones de diámetros, alturas y espesor de caucho, es decir el factor de forma; siendo este una medida de la delgadez de las capas de caucho, calculado para aisladores circulares utilizando la 13, derivada de la 8 originalmente diseñada para aisladores rectangulares.

En las definiciones de factores de forma para aisladores, los coeficientes que representan su estabilización dependen de tres parámetros fundamentales: espesor de la placa de caucho (t_r), el número de capas de caucho (n_r) y el diámetro exterior (d). Estos se expresan para un tipo de sección circular de la siguiente manera:

$$S_1 = \frac{d}{4t_r} \quad 13$$

Donde d es el diámetro del rodamiento y t_r es el espesor de la capa elastomérica.

El factor de forma primario S_1 , mide la compresión local de un aislador y es el principal determinante del comportamiento mecánico bajo cargas verticales. Indica la influencia de la placa interior en la deformación por abultamiento, directamente afectando la rigidez vertical (K_v) y la frecuencia (f_v), lo que a su vez permite desacoplar respuestas dinámicas verticales y horizontales (Montuori et al. 2016).

El rango de factores de forma primarios considerado por investigadores varía desde valores muy bajos hasta 12. Aunque existe poca información disponible sobre los factores de forma típicos para aisladores, especialmente en el rango de 10 a 20 (Van Ngo, Dutta, and Sajal K Deb 2017), se ha determinado que los efectos de borde locales se vuelven

insignificantes después de un umbral de factor de forma de 20 (Montuori et al. 2016). Sin embargo, se han mencionado valores muy bajos en trabajos sobre problemas de estabilidad (5.5-10; 1.8-2.5), los cuales no parecen realistas ni factibles en soluciones de diseño prácticas. Con el objetivo de ampliar el conocimiento existente y proporcionar datos adicionales sobre aisladores con factores de forma más representativos, es necesario recopilar información sobre aisladores con factores de forma en el rango de 12-30, que son ampliamente utilizados en aplicaciones de aislamiento sísmico (Montuori et al. 2016).

El factor de forma S_2 , representa la relación entre el diámetro y la altura total del caucho 14 (Koo et al. 2020), es el inverso de la esbeltez global del soporte, desempeña un papel fundamental en el diseño y el comportamiento sísmico de los aisladores, pues influye en la capacidad de resistir la inestabilidad y afecta la respuesta no lineal durante eventos sísmicos, su variación permite evaluar cómo la esbeltez impacta en el comportamiento mecánico y la interacción entre presión vertical y deformación por corte (Montuori et al. 2016).

$$S_2 = \frac{d}{n_r t_r} \quad 14$$

En publicaciones anteriores, como el libro de Naeim y Kelly, se sugerían valores de S_2 no menores a 3 (Naeim and Kelly 1999), teniendo en cuenta las limitaciones del código AASHTO. Sin embargo, en versiones más recientes de los códigos, como el NTC, se han eliminado estas restricciones y se ha introducido una fórmula de diseño para verificar explícitamente la estabilidad del aislador.

En estudios que varían el valor de S_2 entre 1,5 y 6,2 para evaluar el impacto de la esbeltez en el comportamiento mecánico y el modo de falla, se evidencia que S_2 tiene una influencia significativa en la respuesta de corte frente a la presión vertical, siendo el factor determinante en condiciones sísmicas. Un S_2 más bajo limita la capacidad de soportar desplazamientos mayores, ya que la carga vertical se aleja de la base del dispositivo. Por otro lado, desplazamientos más grandes reducen la superficie de carga efectiva de los dispositivos (De Luca and Guidi 2019).

Dado este contexto, es de interés y utilidad explorar sistemáticamente el impacto del factor de forma secundario S_2 , junto con variaciones en el factor de forma primario S_1 , en el

comportamiento de aisladores frente a la presión vertical y deformación lateral. Esto permitiría registrar y comparar resultados en términos de rigidez vertical y horizontal, identificando patrones y tendencias al variar la altura y el área efectiva del aislador.

La literatura y las pautas de diseño recomiendan rangos de 10–30 para el factor de forma primario (S_1) y de 3–5 para el factor de forma secundario (S_2). En este estudio se seleccionaron rangos ampliados con el objetivo de explorar configuraciones que podrían surgir en diseños reales no convencionales. Para S_1 , se consideraron valores desde 5.00 hasta 22.50 (Tabla 10), los cuales se derivan de variaciones en el diámetro y la altura total del aislador. Esta extensión por debajo del límite inferior recomendado (Tabla 11) permite evaluar el comportamiento en condiciones menos favorables desde el punto de vista geométrico.

En cuanto a S_2 , se analizaron valores comúnmente empleados entre 1.50 y 6.43 (Tabla 10), resultado de cambios en el espesor de la capa de caucho, como se detalla en la Tabla 11. Es importante aclarar que, aunque al modificar S_1 también se generan cambios en S_2 (dado que ambos dependen de las dimensiones del prototipo), en una segunda fase del estudio se mantuvieron constantes las dimensiones externas mientras se alteraba exclusivamente el espesor de la capa elastomérica, permitiendo así un análisis aislado del efecto del S_2 .

Con el objetivo de comprender la influencia geométrica en el comportamiento mecánico de aisladores elastoméricos reforzados con fibra, se realizaron cuatro variaciones sistemáticas en sus dimensiones físicas diámetro, número de capas, altura total y espesor del caucho, las cuales determinan indirectamente los factores de forma primario (S_1) y secundario (S_2). Estas configuraciones permitieron analizar su efecto sobre la rigidez horizontal y el amortiguamiento, considerando exclusivamente el estado más crítico de deformación ($DM = 100\%$). Las gráficas correspondientes se presentan entre las Figuras 13 y 20, mientras que los valores finales de rigidez y amortiguamiento obtenidos mediante simulaciones del ensayo de corte cíclico se resumen en las Tabla 12 y Tabla 13. El análisis se realizó con el modelo de elementos finitos ajustado y validado previamente en el Capítulo 6, empleando las ecuaciones correspondientes para determinar la rigidez horizontal (K_h) y el amortiguamiento (β).

Tabla 10. Variación de número de capas de caucho y fibra

Notación	h [mm]	d [mm]	tf [mm]	nf	Hf [mm]	tr [mm]	nr	Hr [mm]	S1	S2
P1	74	75	1	24	24	2	25	50	9.38	1.50
P2	59	75	1	19	19	2	20	40	9.38	1.88
P3	44	75	1	14	14	2	15	30	9.38	2.50
P4	29	75	1	9	9	2	10	20	9.38	3.75
P5	20	75	1	6	6	2	7	14	9.38	5.36
P6	74	80	1	24	24	2	25	50	10.00	1.60
P7	59	80	1	19	19	2	20	40	10.00	2.00
P8	44	80	1	14	14	2	15	30	10.00	2.67
P9	29	80	1	9	9	2	10	20	10.00	4.00
P10	20	80	1	6	6	2	7	14	10.00	5.71
P11	74	90	1	24	24	2	25	50	11.25	1.80
P12	59	90	1	19	19	2	20	40	11.25	2.25
P13	44	90	1	14	14	2	15	30	11.25	3.00
P14	29	90	1	9	9	2	10	20	11.25	4.50
P15	20	90	1	6	6	2	7	14	11.25	6.43

Tabla 11. Variación del espesor del caucho

Notación	h [mm]	d [mm]	tf [mm]	nf	Hf [mm]	tr [mm]	nr	Hr [mm]	S1	S2
P16	43	75	1	21	21	1	22	22	18.75	3.41
P17	44	75	1	14	14	2	15	30	9.38	2.50
P18	43	75	1	10	10	3	11	33	6.25	2.27
P19	44	75	1	8	8	4	9	36	4.69	2.08
P20	43	75	1	7	7	4.5	8	36	4.17	2.08
P21	43	80	1	21	21	1	22	22	20.00	3.64
P22	44	80	1	14	14	2	15	30	10.00	2.67
P23	43	80	1	10	10	3	11	33	6.67	2.42
P24	44	80	1	8	8	4	9	36	5.00	2.22
P25	43	80	1	7	7	4.5	8	36	4.44	2.22
P26	43	90	1	21	21	1	22	22	22.50	4.09
P27	44	90	1	14	14	2	15	30	11.25	3.00
P28	43	90	1	10	10	3	11	33	7.50	2.73
P29	44	90	1	8	8	4	9	36	5.63	2.50
P30	43	90	1	7	7	4.5	8	36	5.00	2.50

Tabla 12. Rigidez horizontal y amortiguamiento P1 al P15

ID	25%		50%		67%		75%		100%	
	KH _{FEM}	β	KH _{FEM}	β	KH _{FEM}	β	KH _{FEM}	β	KH _{FEM}	β
	[N/mm]	[%]	[N/mm]	[%]	[N/mm]	[%]	[N/mm]	[%]	[N/mm]	[%]
P1	317.07	9.11	262.69	13.36	230.03	13.79	174.57	18.48	159.44	30.76
P2	397.79	10.78	328.28	13.49	287.15	13.43	222.05	16.37	194.39	28.11
P3	522.90	12.25	431.21	13.12	378.20	12.46	297.81	14.19	245.61	24.87
P4	761.63	13.12	615.59	12.14	517.94	12.85	429.58	12.53	327.33	22.82
P5	1043.70	13.00	777.15	14.28	615.01	19.60	539.31	16.79	400.55	29.01
P6	373.18	8.98	309.59	13.01	271.29	13.45	208.26	17.39	190.95	29.61
P7	463.71	10.65	382.84	13.42	336.23	13.14	262.12	15.58	229.64	27.55
P8	606.00	11.97	499.41	12.91	436.10	12.59	348.15	13.63	285.09	25.05
P9	873.38	12.78	687.93	13.10	563.35	14.98	476.55	14.06	365.95	25.06
P10	1168.60	13.37	836.08	17.32	607.09	27.19	546.63	20.40	409.45	35.86
P11	495.15	7.62	408.54	12.08	359.41	13.09	279.92	16.34	257.92	28.26
P12	608.05	8.72	501.29	12.60	437.49	13.23	347.57	14.98	298.74	27.36
P13	785.90	9.80	637.03	12.87	539.95	14.33	442.64	14.05	355.16	26.59
P14	1104.20	10.61	798.57	16.30	637.97	22.85	551.13	20.04	409.36	36.38
P15	1395.13	12.45	830.90	24.27	487.71	37.46	530.53	30.33	419.55	45.49

Tabla 13. Rigidez horizontal y amortiguamiento P16 al P30

ID	25%		50%		67%		75%		100%	
	KH _{FEM}	β	KH _{FEM}	β	KH _{FEM}	β	KH _{FEM}	β	KH _{FEM}	β
	[N/mm]	[%]	[N/mm]	[%]	[N/mm]	[%]	[N/mm]	[%]	[N/mm]	[%]
P16	536.44	9.93	441.84	12.75	389.63	12.13	306.32	13.51	253.14	23.81
P17	522.90	12.25	431.21	13.12	378.20	12.46	297.81	14.19	245.61	24.87
P18	533.09	10.19	436.36	13.14	379.24	12.69	300.84	14.32	245.13	25.03
P19	519.49	10.41	422.72	13.49	365.46	13.00	291.00	14.65	238.73	25.29
P20	526.12	10.79	429.05	13.75	371.10	13.13	297.41	14.57	245.19	25.37
P21	620.40	9.79	511.91	12.56	449.70	12.24	357.76	13.21	295.04	23.74
P22	606.00	11.97	499.41	12.91	436.10	12.59	348.15	13.63	285.09	25.05
P23	616.24	10.04	504.41	12.86	434.94	12.99	350.99	13.82	281.16	25.64
P24	602.11	10.11	488.93	13.31	421.78	13.00	339.54	14.12	274.18	24.89
P25	608.90	10.58	495.40	13.29	426.98	12.82	347.02	14.18	280.56	26.20
P26	802.75	9.87	654.94	12.66	561.39	13.59	457.78	13.52	377.37	25.64
P27	785.90	9.80	637.03	12.87	539.95	14.33	442.64	14.05	355.16	26.59
P28	796.97	9.82	637.46	13.37	521.88	15.77	437.06	15.18	334.70	29.40
P29	775.78	10.17	619.56	13.26	506.88	15.77	427.41	15.03	325.59	30.91
P30	792.60	10.34	628.01	13.44	509.29	15.95	433.98	14.90	329.12	30.81

En primer lugar, se analizó la configuración de mismo diámetro y diferente altura, lo que permitió mantener constante el factor de forma primario (S_1) mientras se modificaba el secundario (S_2). Esta variación está asociada a la esbeltez global del aislador. Los resultados indicaron que, al aumentar la altura total del dispositivo (reduciendo así S_2), la rigidez horizontal disminuye significativamente (Figura 14). Desde una perspectiva teórica, esto se explica mediante la ecuación 5, donde una mayor altura reduce la rigidez al incrementar la longitud efectiva de corte. Sin embargo, este cambio no es netamente numérico, se detectó que los aisladores más altos son los primeros en alcanzar condiciones cercanas al volcamiento, como se observó en los desplazamientos laterales máximos y en la distribución de esfuerzos en los modelos.

Este fenómeno incrementa el riesgo de volcamiento en condiciones de carga extrema, lo cual no necesariamente implica una pérdida inmediata de funcionalidad del aislador, ya que dispositivos volcados pueden seguir operando de forma aceptable en ciertos casos. Sin embargo, si se alcanza el vuelco completo, la orientación de las caras laterales puede provocar fricción no deseada y daño en el caucho, lo que compromete la integridad del dispositivo. Por ello, este tipo de configuraciones deben ser evaluadas cuidadosamente y no se recomiendan para estructuras que requieren un desempeño continuo sin degradación bajo sollicitaciones sísmicas severas.

Por otro lado, en la Figura 15 se observó que los aisladores con mayor altura y número de capas de caucho tienden a presentar un mayor amortiguamiento, debido al incremento en el volumen de material elastomérico disponible para disipar energía mediante deformaciones por corte. No obstante, este aumento no es lineal, a partir de cierto punto, el efecto se estabiliza, indicando un límite práctico en la eficiencia del material. Si bien los aisladores más altos tienden a presentar mayor amortiguamiento por su mayor capacidad de deformación, esta ganancia no compensa el riesgo de inestabilidad asociado a su esbeltez. En contraste, los dispositivos más bajos son más estables, pero disipan menos energía por su mayor confinamiento.

El caso del aislador de 20 mm de altura mostró un valor atípicamente alto de amortiguamiento, posiblemente asociado a efectos locales, como un confinamiento extremo

del caucho y concentraciones de tensiones. Estas condiciones pueden inducir deformaciones localizadas y respuestas no lineales más marcadas, aumentando la fricción interna y la disipación de energía. Sin embargo, este comportamiento no representa una mejora en el desempeño, sino una señal de que el aislador podría estar operando cerca de sus límites mecánicos, comprometiendo su estabilidad y durabilidad.

En este contexto, lo ideal no es diseñar aisladores extremadamente rígidos, ya que podrían transmitir aceleraciones sísmicas elevadas a la estructura, ni excesivamente flexibles, pues eso comprometería la estabilidad y aumentaría los desplazamientos. Lo deseable es lograr un equilibrio entre rigidez y flexibilidad, evitando configuraciones geométricas que favorezcan el volcamiento. En general, los resultados obtenidos apoyan el uso de alturas moderadas y factores de forma dentro de rangos históricamente validados, ajustados a las necesidades específicas de cada estructura.

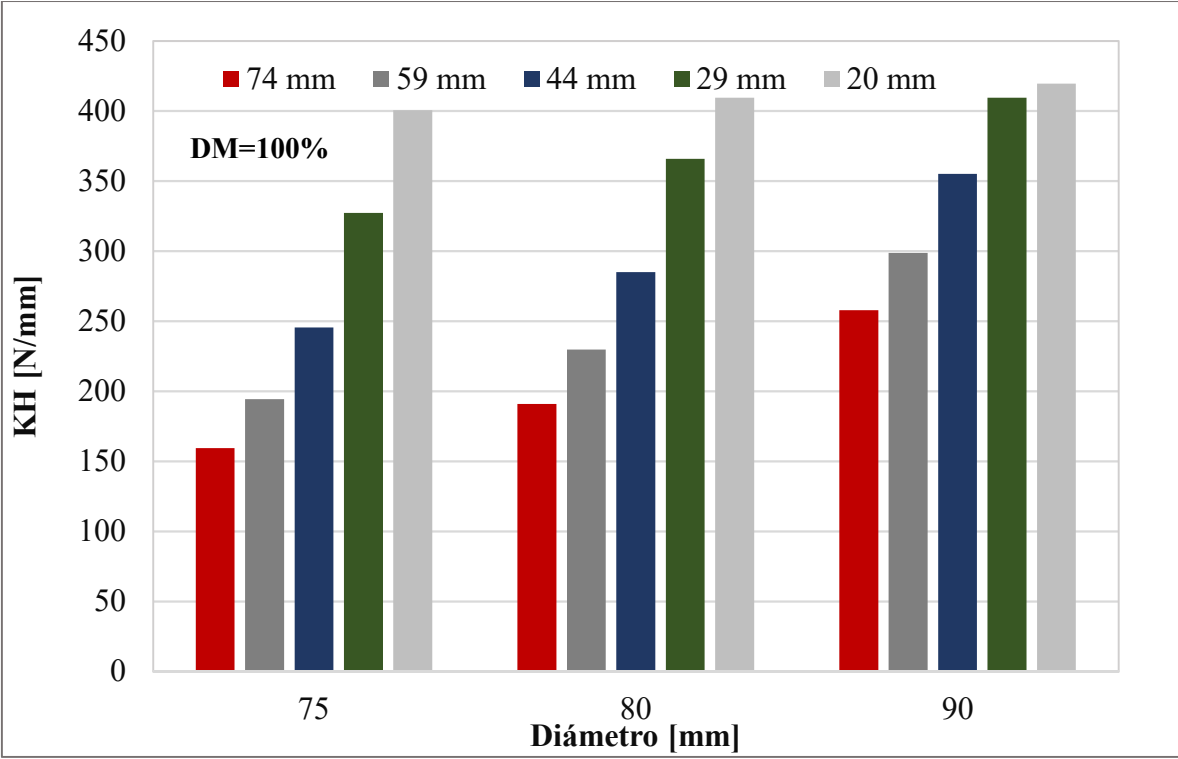


Figura 14. Rigidez horizontal prototipos con igual diámetro y diferente altura de aislador

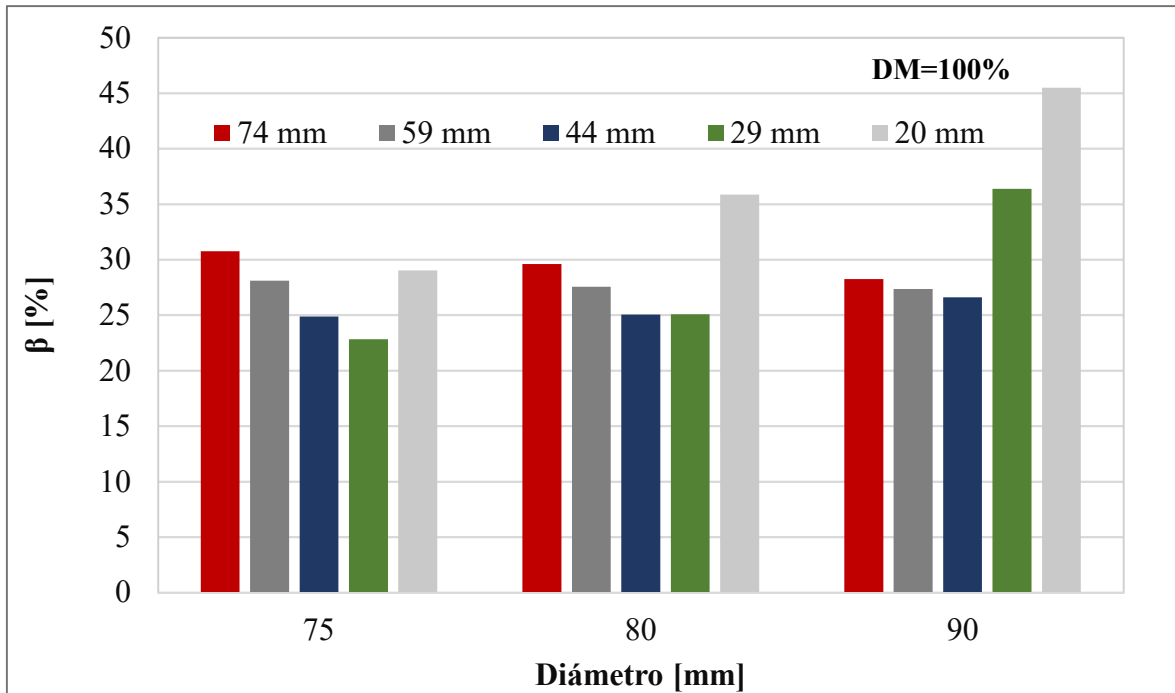


Figura 15. Amortiguamiento prototipos con igual diámetro y diferente altura de aislador

En la configuración con mismo diámetro y diferente espesor de caucho, se mantuvo constante el factor de forma secundario (S_2) y se modificó únicamente el primario (S_1) ajustando el espesor de cada capa elastomérica. Los resultados mostraron que, al reducir el espesor del caucho, la rigidez horizontal aumentó significativamente, hasta en un 40 % respecto a los prototipos con capas más gruesas (Figura 16).

Esto se debe a un mayor confinamiento del material, que limita su capacidad de deformación lateral y reduce el efecto de abultamiento, mejorando además la estabilidad ante cargas extremas, ya que los modelos con S_1 alto limitan los desplazamientos laterales y se mantiene más estable durante la carga sin inclinarse excesivamente ni mostrar comportamientos cercanos al volcamiento, esto debido a que cuando el espesor de caucho por capa es menor hay más capas en todo el aislador para cumplir su altura.

Sin embargo, este aumento de rigidez vino acompañado de una reducción en el amortiguamiento (Figura 17), dado que el volumen de caucho disponible para deformarse internamente es menor. Por el contrario, aisladores con capas más gruesas presentaron mayores valores de amortiguamiento, aunque este incremento se estabiliza a partir de espesores superiores a 3 mm, lo que indica un límite práctico en la eficiencia energética. Esta

configuración es recomendable en edificaciones donde se prioriza el control de desplazamientos y la rigidez basal.

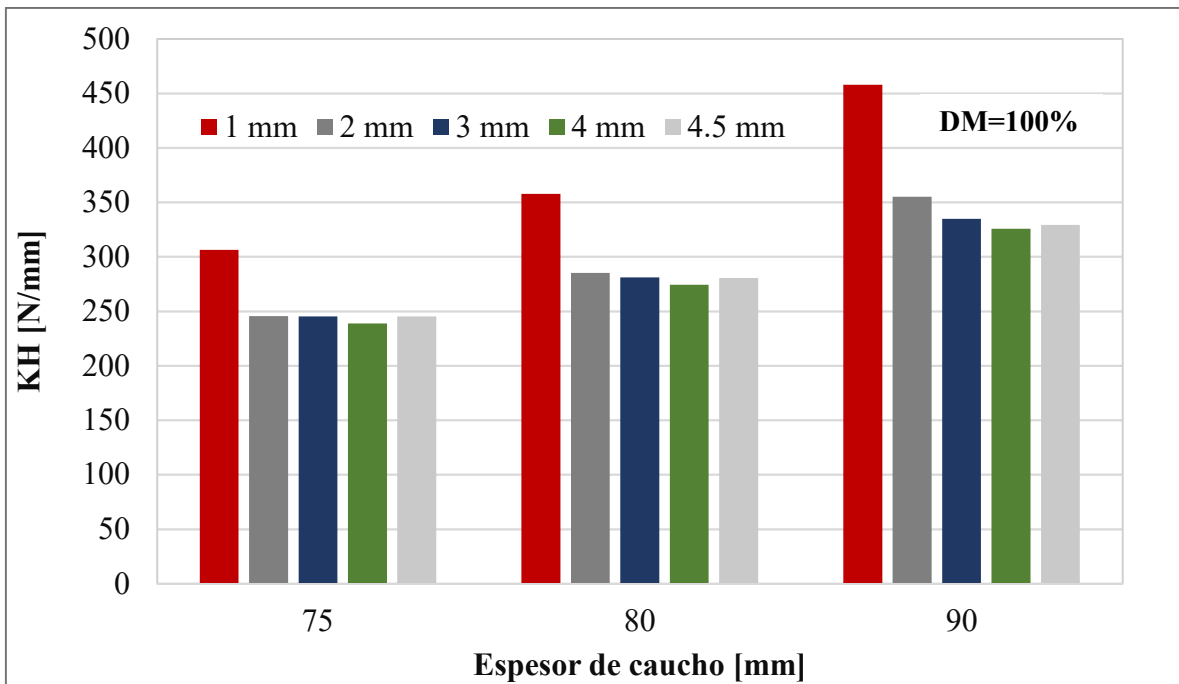


Figura 16. Rigidez horizontal prototipos con igual diámetro y diferente espesor de caucho

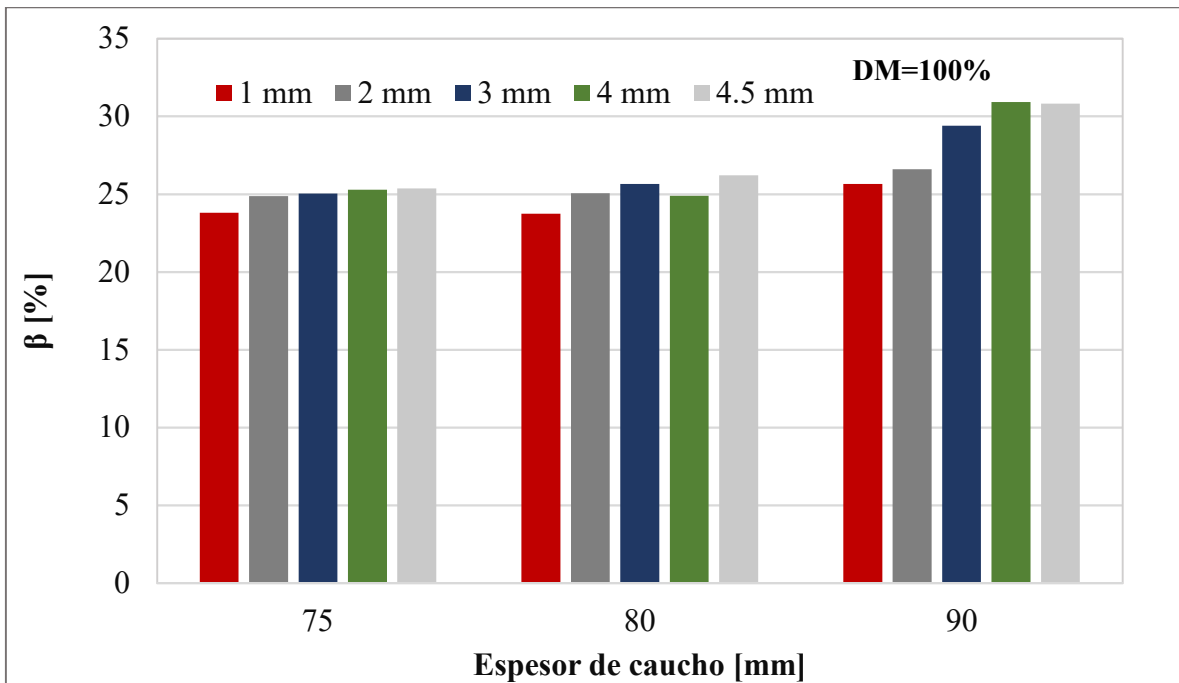


Figura 17. Amortiguamiento prototipos con igual diámetro y diferente espesor de caucho

En la tercera variación, se estudió la influencia de diferente diámetro e igual altura, lo que implicó una modificación simultánea de S_1 y S_2 . Al aumentar el diámetro, se incrementó el área efectiva (A_e), y, en consecuencia, se obtuvo un incremento notable de la rigidez horizontal (Figura 18). Este comportamiento es predecible según la misma fórmula, pero los modelos revelaron un hallazgo relevante: los aisladores con mayor diámetro retrasan significativamente el inicio del volcamiento, lo que se atribuye a una base de apoyo más amplia y una distribución de esfuerzos más uniforme. Esta característica mejora la seguridad sísmica del sistema, ya que permite una mayor capacidad de resistencia al esfuerzo cortante y una menor susceptibilidad a deformaciones excesivas.

Sin embargo, el amortiguamiento mostró una leve disminución conforme se incrementó el diámetro, probablemente debido a la menor deformación específica que experimenta el caucho cuando la carga se distribuye sobre una mayor superficie (Figura 19). Desde un punto de vista de diseño, aumentar el diámetro es una estrategia eficiente para estructuras con altos requerimientos de rigidez lateral y estabilidad, aunque debe equilibrarse con las dimensiones disponibles en el sitio de construcción y las cargas verticales esperadas.

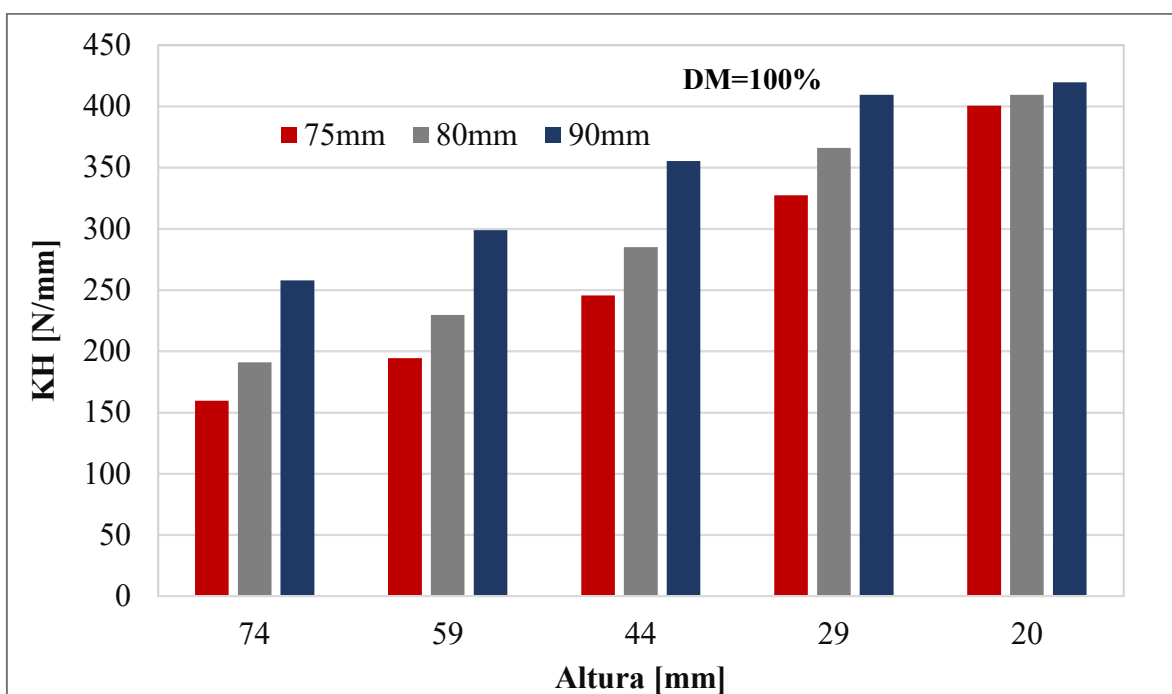


Figura 18. Rigidez horizontal prototipos con igual altura y diferente diámetro de aislador

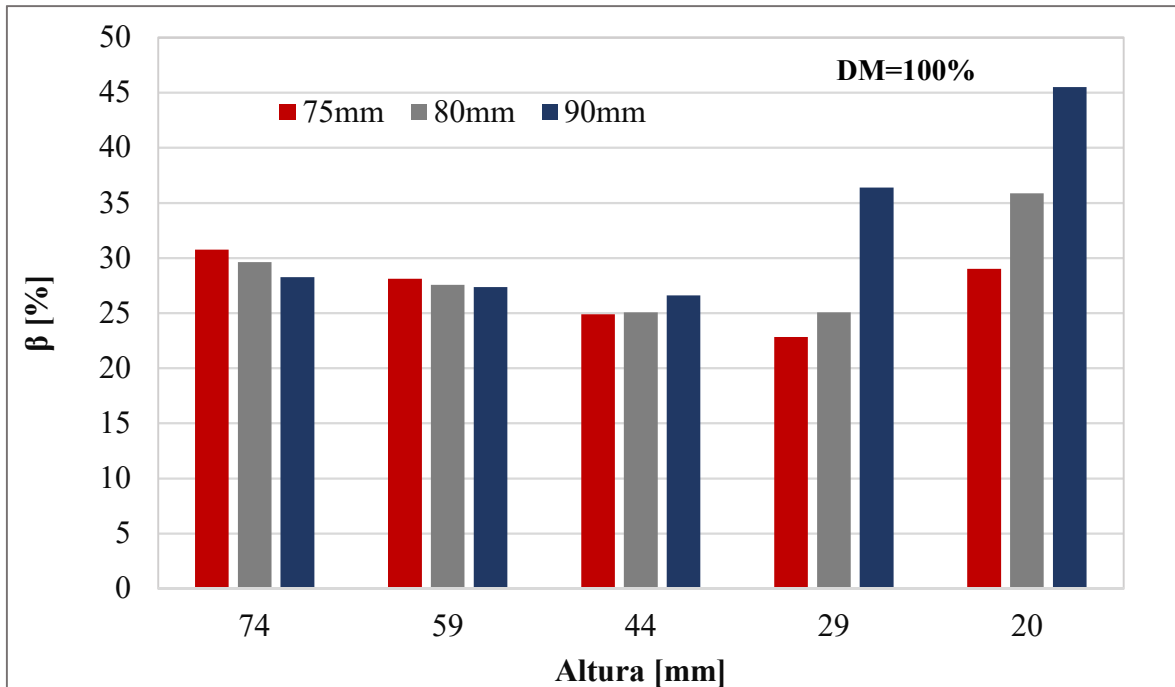


Figura 19. Amortiguamiento prototipos con igual altura y diferente diámetro de aislador

En el segundo escenario analizado, donde se mantiene constante el espesor del caucho, pero se varía el diámetro, se observa que la rigidez horizontal también aumenta con el diámetro, aunque el efecto es menos pronunciado en comparación con el caso anterior. Esto se debe a que, al mantener constante el espesor del caucho, la capacidad de deformación del elastómero sigue siendo la misma, pero el área de contacto con la carga sísmica es mayor, lo que contribuye a una mayor resistencia lateral.

Los resultados indican que, en comparación con aisladores de menor diámetro, los modelos con mayor diámetro presentan una rigidez entre un 30% y 40% superior, lo que confirma que el diámetro sigue siendo un factor determinante en la resistencia mecánica del aislador, incluso cuando el espesor del caucho se mantiene sin cambios (Figura 20).

En cuanto al amortiguamiento (Figura 21), se confirma la tendencia observada en el caso anterior: un mayor diámetro conduce a una reducción en la disipación de energía. Sin embargo, en este caso, la disminución del amortiguamiento es menos significativa, ya que el espesor del caucho se mantiene constante, permitiendo que la histéresis del material siga funcionando de manera efectiva. A pesar de esto, los datos sugieren que el efecto del diámetro en la disipación de energía no es tan crítico como el espesor del caucho, lo que indica que el

diámetro puede ajustarse para mejorar la rigidez sin afectar sustancialmente la capacidad de amortiguación.

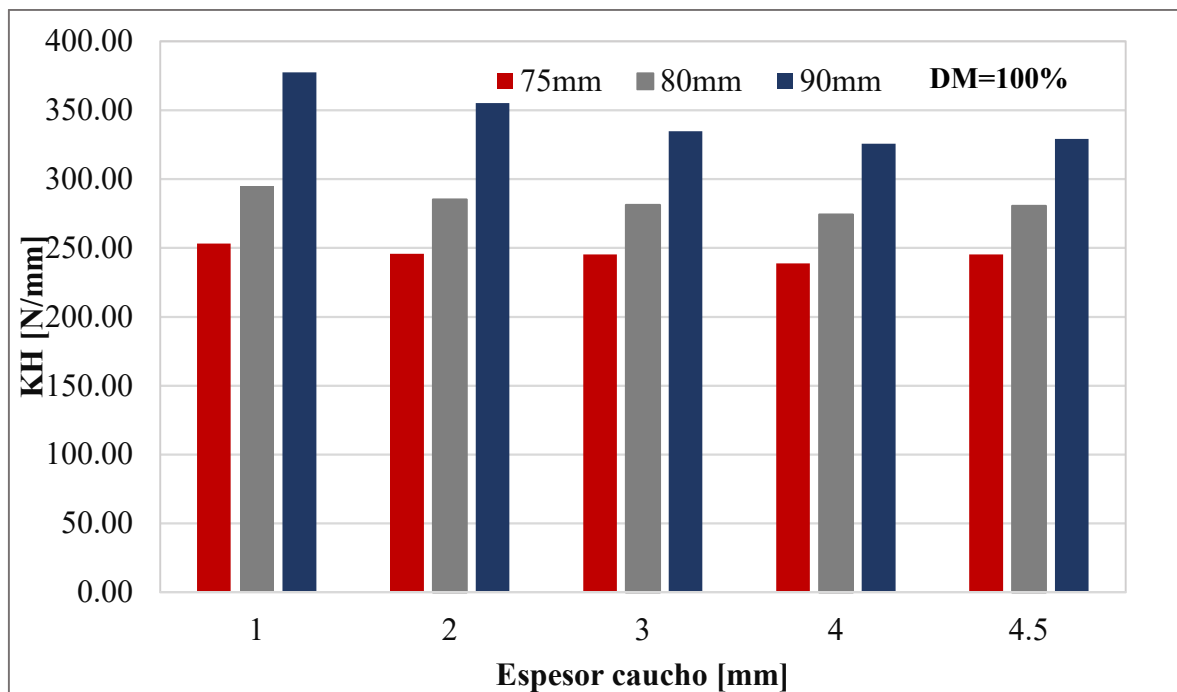


Figura 20. Rigidez horizontal prototipos con igual espesor de caucho y diferente diámetro de aislador

Estos hallazgos refuerzan la idea de que, para estructuras que requieren alta estabilidad, un mayor diámetro es beneficioso, siempre que se mantenga un espesor de caucho adecuado para garantizar un nivel aceptable de disipación de energía.

Con base en estos resultados, y considerando la evidencia histórica y normativa revisada, se concluye que no es recomendable emplear factores de forma extremos en el diseño de aisladores. Valores de S_1 por debajo de 6 o por encima de 30, o S_2 menores de 2 o mayores de 7, pueden conducir a configuraciones estructuralmente ineficientes o potencialmente inestables. En cambio, los resultados y la literatura respaldan el uso de valores intermedios, típicamente en los rangos de S_1 entre 10 y 25 y S_2 entre 3 y 5, los cuales aseguran un balance adecuado entre rigidez, capacidad de disipación, y estabilidad frente al volcamiento, alineándose con la práctica actual del aislamiento sísmico en edificaciones y puentes.

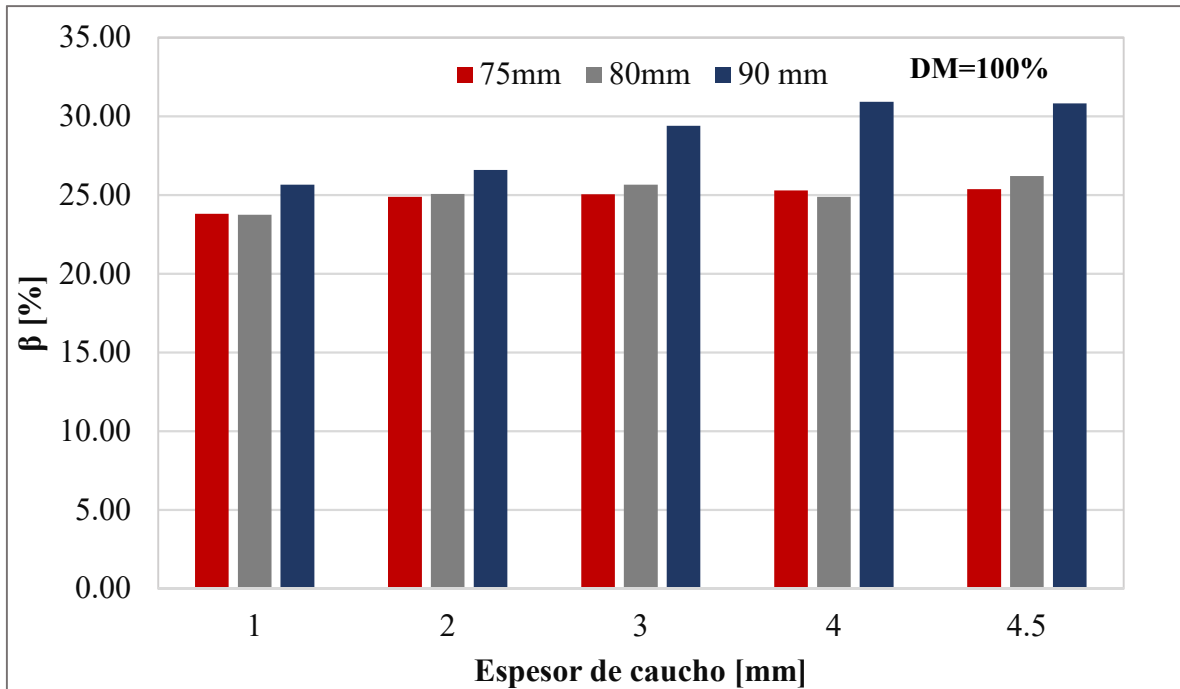


Figura 21. Amortiguamiento prototipos con igual esesor de caucho y diferente diámetro de aislador

Con base en los factores de forma obtenidos para los prototipos analizados, se identificó que los dispositivos P3, P4, P5, P7, P8, P9, P10, P12, P13 y P14 se encuentran dentro de los rangos geométricos recomendados (S_1 entre 10 y 25, y S_2 entre 3 y 5). Estas configuraciones presentan un buen equilibrio entre rigidez, capacidad de disipación de energía y estabilidad frente al volcamiento, lo cual las hace apropiadas para aplicaciones prácticas en aislamiento sísmico. En cambio, prototipos con factores de forma fuera de estos rangos como P1, P2, P6, P11 y P15 podrían comprometer el desempeño estructural, ya sea por baja rigidez, excesiva flexibilidad o riesgo de inestabilidad.

8. ANALISIS DE LOS EFECTOS DEL CAMBIO DE REFUERZO

Con el objetivo de mejorar la rigidez vertical de los aisladores sísmicos fabricados con caucho reciclado, se llevó a cabo un estudio mediante elementos finitos que simula su comportamiento mecánico bajo cargas verticales y laterales. Esta mejora se busca particularmente frente al desempeño de refuerzos como la fibra de poliéster, que ha mostrado rigideces inferiores en investigaciones previas, atribuibles a su bajo módulo de elasticidad (I. Madera Sierra 2018; I. Madera Sierra et al. 2020).

Para este análisis, se partió de una configuración base de aislador con dimensiones, geometría y condiciones de contorno constantes, sobre la cual se evaluó exclusivamente la influencia del tipo de refuerzo. Se estudiaron dos materiales: una malla de fibra de vidrio con resina epóxica (FVE) y una fibra de alto módulo HR220 (HRA). Ambos fueron modelados como materiales isotrópicos, cuyas propiedades mecánicas (módulo de elasticidad, espesor y coeficiente de Poisson) fueron extraídas de la caracterización experimental presentada por (Rivas Ordoñez et al. 2024). Adicionalmente se realizó la comparación con la fibra de poliéster del modelo calibrado en el capítulo 6.

La elección de estos materiales se fundamenta en su disponibilidad comercial, en el contraste de sus propiedades mecánicas, y en su aplicabilidad práctica. El FVE, aunque más costoso, ha demostrado alto desempeño estructural. El HRA, por otro lado, representa una opción más económica y de fácil adquisición, permitiendo evaluar la viabilidad de soluciones de bajo costo.

Las características del refuerzo para el modelo fueron las siguientes:

- Malla de fibra de vidrio con resina epóxica (FVE) se modelo con parámetros isotrópicos, el módulo de elasticidad es $E = 2279.9$ MPa, igual en el plano, la relación de Poisson es $\nu = 0.38$ y el espesor es $t_{fg} = 1.36$ mm (Rivas Ordoñez et al. 2024).
- Fibra de alto módulo HR220 (HRA) fue modelada con parámetros isotrópicos, el módulo de elasticidad es $E = 712.3$ MPa, igual en el plano, la relación de Poisson es $\nu = 0.30$ y el espesor es $t_{fHRA} = 0.83$ mm (Rivas Ordoñez et al. 2024)

En el análisis numérico del comportamiento vertical (Tabla 14), se observó que el modelo FEM con refuerzo FVE presentó una rigidez media ($K_v_FEM_avg$) de 17,32 kN/mm, mientras que el modelo con refuerzo HRA alcanzó 13,26 kN/mm, lo que representa una reducción aproximada del 23 %. Por su parte, el modelo con refuerzo de fibra de poliéster obtuvo una rigidez media de 14,31 kN/mm, ubicándose entre los dos anteriores y evidenciando un comportamiento intermedio. Esta diferencia en rigidez es coherente con las propiedades mecánicas de los materiales utilizados: la fibra HRA posee un módulo de elasticidad de 712 MPa y un espesor de 0,83 mm, mientras que el FVE alcanza los 2279 MPa con un espesor de 1,36 mm. La fibra de poliéster presentó propiedades intermedias tanto en módulo como en espesor, lo que se refleja en su desempeño estructural. De acuerdo con la ecuación (7) propuesta por Kelly y Konstantinidis (2011), la rigidez vertical depende directamente del producto del módulo de elasticidad y el espesor del refuerzo, así como de la relación geométrica del aislador, lo que justifica las diferencias observadas entre los tres modelos.

La rigidez vertical teórica (K_v_th) calculada con la ecuación analítica fue de 62,30 kN/mm para FVE, 22,32 kN/mm para poliéster y 16,98 kN/mm para HRA. Al compararlas con los resultados del modelo FEM, se observaron errores del 70 %, 36 % y 22 % respectivamente, lo que evidencia que la ecuación analítica no representa adecuadamente el comportamiento no lineal real de los materiales, especialmente en configuraciones con mayor rigidez como la FVE y el poliéster.

Por otro lado, en términos de rigidez horizontal (K_h_FEM), los tres tipos de refuerzo FVE, HRA y poliéster exhibieron comportamientos similares dentro de un rango de 242,19 a 527,00 N/mm, especialmente en niveles bajos de deformación. Sin embargo, se evidenció que el comportamiento lateral del aislador está más influenciado por la geometría y la deformabilidad del caucho que por el tipo de refuerzo. A deformaciones elevadas, el refuerzo con fibra de poliéster mostró rigideces comparables a las del FVE, aunque con una respuesta ligeramente más variable. En cuanto al comportamiento histerético, el HRA presentó bucles más estrechos, reflejando una menor capacidad de disipación de energía, mientras que el FVE y el poliéster generaron bucles más amplios, indicando una mayor eficiencia energética en la deformación por corte.

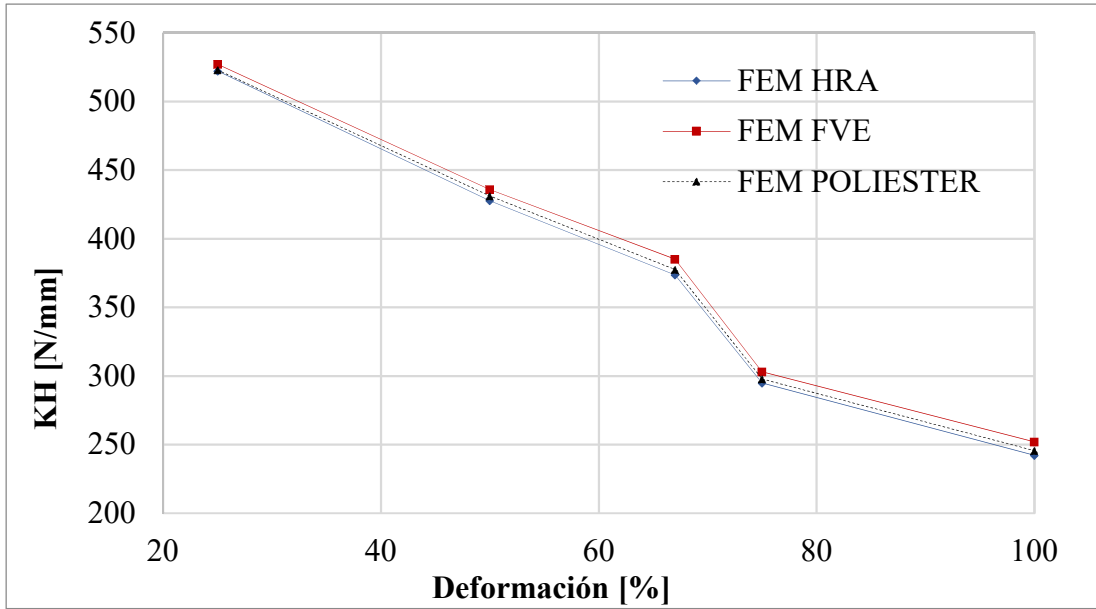
Tabla 14. Compresión cíclica, MEF y resultados teóricos

Prototipo	K_{VFEM_avg} [kN/mm]	K_{vth} [kN/mm]	Costo [USD/m²]
FEM FVE	17.32	62.30	17.90
FEM HRA	13.26	16.98	8.4
FEM POLIESTER	14.31	25.22	27.62

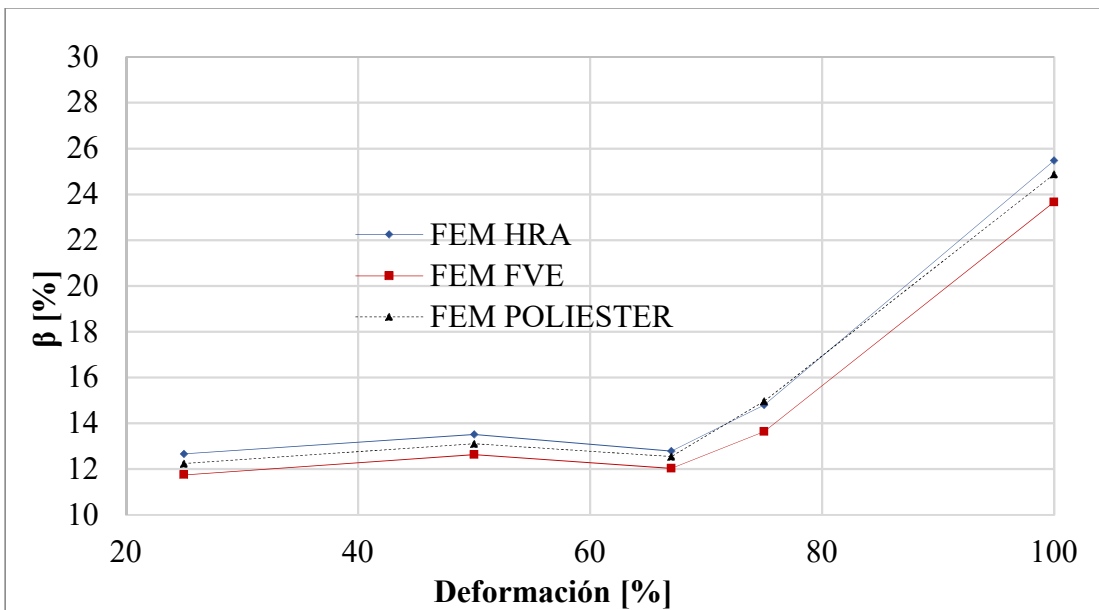
La Figura 22 muestra las rigideces horizontales (K_h) y los coeficientes de amortiguamiento equivalente obtenidos mediante los modelos FEM para distintos niveles de deformación lateral.

Tabla 15. Resultados KH_{FEM} [N/mm]

γ	25%	50%	67%	75%	100%
Prototipo	KH_{FEM}				
FVE	527.00	435.84	385.12	303.02	251.95
HRA	522.10	427.61	373.56	294.85	242.19
POLIESTER	522.91	431.16	377.55	245.63	297.83



(a)



(b)

Figura 22. Resultados a) rigidez horizontal y b) amortiguamiento para distintas deformaciones

A partir de los resultados obtenidos mediante el modelado por elementos finitos, se concluye que el refuerzo con malla de fibra de vidrio y resina epóxica (FVE) presenta un comportamiento estructural superior al de poliéster y a la fibra de alto módulo HR220 (HRA) en términos de rigidez vertical, lo cual lo posiciona como el refuerzo más adecuado para mejorar la capacidad portante de aisladores sísmicos fabricados con caucho reciclado. Aunque el HRA y poliéster mostraron una menor rigidez lateral característica favorable para la disipación de energía en aplicaciones donde se prioriza flexibilidad, los análisis numéricos revelan que el FVE logra un balance más favorable entre rigidez vertical y comportamiento lateral, ofreciendo un mejor desempeño integral.

En cuanto al costo, el HRA resulta 2,15 veces más económico que el FVE y su adquisición es más directa, ya que es un producto comercial disponible al igual que la de poliéster, sin embargo, es 1.54 veces más costosa que la FVE (Tabla 14).

Los resultados experimentales obtenidos por Rivas Ordoñez et al. 2024 corroboran los hallazgos de este estudio numérico y reforzaron la elección del FVE como la mejor opción estructural. En su análisis, Rivas identificó que el FVE no solo presentó el módulo de elasticidad más alto entre todos los materiales evaluados, sino que también superó el promedio de desempeño de los demás refuerzos en un 54 %, y en comparación con otros materiales tradicionales, logró mejoras en rigidez con espesores reducidos. Además, su comportamiento frente a esfuerzos de tracción fue superior en un 86 %, lo que valida su idoneidad como refuerzo en condiciones críticas (Tabla 16).

Tabla 16. Resultados de la caracterización mecánica de refuerzos (Rivas Ordoñez et al. 2024)

	Espesor (mm)	Módulo elástico (MPa)	Fuerza (MPa)	Deformación (mm/mm)	Tf * E (N/mm)	Relación de Poisson	Costo (USD/m2)
HRA	0.83	712.27	263.30	0.57	591.18	0.30	\$ 8.40
TR	1.1	148.44	34.00	0.46	163.29	0.40	\$ 7.50
GM	5.46	567.71	71.56	0.38	3099.69	0.23	\$ 19.67
IR	4.85	464.46	80.68	0.39	2252.63	0.20	\$ 36.62
FVE	1.36	2279.88	240.11	0.11	3100.63	0.39	\$ 17.90
FP	2.52	1432.41	71.06	0.02	3609.67	0.35	\$ 15.20
PLE	2.02	691.28	103.56	0.63	1396.38	0.30	\$ 27.62
FB	2.24	247.35	18.68	0.19	554.05	0.45	\$ 15.25

De esta forma, aunque el HRA represente una opción más rentable en términos económicos, la robustez mecánica del FVE, comprobada tanto en simulaciones como en ensayos físicos, lo convierte en la alternativa más confiable desde el punto de vista estructural. La fibra de poliéster, a pesar de presentar el coste más elevado y un desempeño intermedio en rigidez y amortiguamiento, no iguala el balance global que ofrece el FVE. Por todo ello, se elige el refuerzo con malla de fibra de vidrio y resina epóxica (FVE), priorizando el desempeño estructural por encima del costo en el diseño de dispositivos de aislamiento sísmico eficientes y duraderos.

9. CONCLUSIONES

La modelación del aislador de caucho reciclado reforzado con fibra de poliéster como un único elemento cilíndrico, con la fibra representada como una superficie intermedia (*midsurface*), en comparación con un modelo tridimensional detallado que representa cada capa de caucho y refuerzo individualmente, esta simplificación reduce la cantidad de nodos y disminuye el esfuerzo computacional en un factor de 30, permitiendo soluciones más rápidas sin comprometer la precisión.

El modelo calibrado representa adecuadamente el comportamiento no lineal del aislador, como se verificó con resultados experimentales de compresión y corte. Para mejorar la precisión, se realizó una calibración en tres etapas considerando ciclos de deformación del 25%, 50%, 67%, 100% y 75%, permitiendo ajustar la respuesta del modelo a los efectos de daño y desprendimiento del material en deformaciones elevadas. Se desarrollaron modelos independientes para compresión y corte con compresión simultánea, y se obtuvieron errores promedio de predicción del 12 % en compresión y del 10 % en corte para el ciclo de 25 % de deformación, y reduciéndose a tan solo el 2 % en el ciclo de 67%. Estos niveles de precisión están dentro de lo permitido para calibración.

El factor de forma primario (S_1) afecta principalmente la rigidez vertical del aislador, aumentando su resistencia bajo cargas gravitatorias sin influir significativamente en la rigidez horizontal ni en el amortiguamiento. En contraste, el factor de forma secundario (S_2) es determinante en la estabilidad lateral y la esbeltez del aislador, ya que valores bajos de S_2 reducen la rigidez horizontal y aumentan la tendencia al vuelco. S_2 también tiene un efecto moderado en la amortiguación, por lo que su selección debe optimizarse para maximizar la rigidez horizontal sin comprometer la estabilidad.

Los resultados obtenidos a partir de simulaciones de corte cíclico demostraron que los factores de forma primario (S_1) y secundario (S_2) inciden significativamente en la rigidez horizontal y el amortiguamiento de los aisladores. En configuraciones con S_1 elevados (mayor número de capas de caucho delgado), se alcanzaron rigideces más altas debido al mayor confinamiento lateral, mientras que S_2 bajos (mayor altura total) redujeron la rigidez e incrementaron el riesgo de volcamiento por aumento en la esbeltez global del aislador.

Con base en estos resultados, y considerando la evidencia histórica y normativa revisada, se concluye que no es recomendable emplear factores de forma extremos en el diseño de aisladores. Valores de S_1 por debajo de 6 o por encima de 30, o S_2 menores de 2 o mayores de 7, pueden conducir a configuraciones estructuralmente ineficientes o potencialmente inestables. En cambio, los resultados y la literatura respaldan el uso de valores intermedios, típicamente en los rangos de S_1 entre 10 y 25 y S_2 entre 3 y 5, los cuales aseguran un balance adecuado entre rigidez, capacidad de disipación y estabilidad frente al volcamiento, alineándose con la práctica actual del aislamiento sísmico.

Se evidenció que el amortiguamiento no crece indefinidamente con el espesor del caucho ni con la altura del dispositivo. Existe una zona de estabilización a partir de ciertos umbrales geométricos (espesores mayores a 3 mm o alturas mayores a 59 mm), donde la mejora en la disipación de energía se vuelve marginal. Esto sugiere que aumentar el volumen de caucho no necesariamente resulta en una mejor respuesta sísmica, sino que podría comprometer la estabilidad del aislador.

Se observó que los prototipos con mayor altura y menor diámetro (es decir, con bajos valores de S_2) presentaron una tendencia clara al inicio del volcamiento bajo grandes deformaciones. Por el contrario, configuraciones con mayor área efectiva (diámetro alto) y espesores moderados (valores intermedios de S_1) demostraron mayor resistencia al desplazamiento fuera del plano. Esto respalda la necesidad de evitar aisladores excesivamente esbeltos en estructuras donde no se cuente con sistemas de centrado o topes laterales.

Con base en los factores de forma analizados, los prototipos P3, P4, P5, P7, P8, P9, P10, P12, P13 y P14 se ubicaron dentro de los rangos geométricos recomendados (S_1 entre 10 y 25, y S_2 entre 3 y 5), mostrando un equilibrio adecuado entre rigidez, disipación de energía y estabilidad. En contraste, los prototipos P1, P2, P6, P11 y P15, al estar fuera de estos rangos, podrían presentar un desempeño estructural comprometido por su baja rigidez, excesiva flexibilidad o mayor riesgo de inestabilidad.

El modelo calibrado permitió evaluar el desempeño de distintos materiales de refuerzo, destacando que la malla de fibra de vidrio con resina epóxica (FVE) incrementa la rigidez

del aislador en un 17 % en dirección vertical y entre un 26 % y 55 % en dirección horizontal, dependiendo del nivel de deformación. Aunque el refuerzo de fibra de alto módulo HR220 (HRA) es aproximadamente 2,15 veces más económico, el de poliéster tuvo resultados aproximados pero es muy costoso, los resultados numéricos y experimentales demostraron que el FVE ofrecía un comportamiento estructural superior, logrando un equilibrio más favorable entre rigidez vertical y desempeño lateral, por lo que se posiciona como el refuerzo más adecuado para mejorar la capacidad portante de aisladores sísmicos fabricados con caucho reciclado.

Contar con modelos numéricos calibrados fue indispensable para reproducir con precisión el comportamiento no lineal de los aisladores y minimizar la necesidad de ensayos físicos costosos. Un modelo calibrado en etapas de deformación y validado frente a datos de compresión y corte no solo mejoró la exactitud de las predicciones mecánicas, sino que además facilitó la evaluación de variaciones geométricas y de refuerzo en configuraciones alternativas. De este modo, se pudieron explorar de forma eficiente rangos de diseño, optimizar factores de forma y seleccionar materiales de refuerzo, garantizando dispositivos de aislamiento sísmico más robustos, estables y adaptados a requisitos específicos.

10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Al-Anany, Yasser M., Niel C. Van Engelen, and Michael J. Tait. 2017. “Vertical and Lateral Behavior of Unbonded Fiber-Reinforced Elastomeric Isolators.” *Journal of Composites for Construction* 21(5):1–11. doi: 10.1061/(asce)cc.1943-5614.0000794.
- Ali, Hosam-Eddin M., and Ahmed M. Abdel-Ghaffar. 1995. “Modeling of Rubber and Lead Passive-Control Bearings for Seismic Analysis.” *Journal of Structural Engineering* 121(7):1134–44. doi: 10.1061/(asce)0733-9445(1995)121:7(1134).
- Calabrese, A., D. Losanno, M. Spizzuoco, S. Strano, and M. Terzo. 2019. “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* 192(March):126–44. doi: 10.1016/j.engstruct.2019.04.076.
- Calabrese, Andrea. 2013. “Analytical, Numerical and Experimental Study of a Novel Low-Cost Base Isolation System.” 249.
- Castillo Ruano, Pablo, and Alfred Strauss. 2018. “An Experimental Study on Unbonded Circular Fiber Reinforced Elastomeric Bearings.” *Engineering Structures* 177:72–84. doi: 10.1016/j.engstruct.2018.09.062.
- CEPAL. 1999. “El Terremoto de Enero de 1999 En Colombia: Impacto Socioeconómico Del Desastre En La Zona Del Eje Cafetero.” 93.
- Chen, Wal F., and Charles Scawthorn. 2003. *Earthquake Engineering Handbook*.
- Chen, Xu, Kohju Ikago, Zhongguo Guan, Jianzhong Li, and Xiaowei Wang. 2022. “Lead-Rubber-Bearing with Negative Stiffness Springs (LRB-NS) for Base-Isolation Seismic Design of Resilient Bridges: A Theoretical Feasibility Study.” *Engineering Structures* 266(July):114601. doi: 10.1016/j.engstruct.2022.114601.
- Cilento, Fabrizia, Daniele Losanno, and Luigi Piga. 2022a. “An Experimental Study on a Novel Reclaimed Rubber Compound for Fiber-Reinforced Seismic Isolators.” *Structures* 45(September):9–22. doi: 10.1016/j.istruc.2022.09.009.
- Cilento, Fabrizia, Daniele Losanno, and Luigi Piga. 2022b. “An Experimental Study on a Novel Reclaimed Rubber Compound for Fiber-Reinforced Seismic Isolators.” *Structures* 45:9–22. doi: 10.1016/j.istruc.2022.09.009.
- Dassault Systèmes Simulia. 2012. “Abaqus 6.12 Analysis User’s Manual: Prescribed Conditions, Constraints & Interactions.” *Abaqus 6.12* 5:831.
- Domenico, D. De, D. Losanno, and N. Vaiana. 2023. “Experimental Tests and Numerical Modeling of Full-Scale Unbonded Fiber Reinforced Elastomeric Isolators (UFREIs) under Bidirectional Excitation.” *Engineering Structures* 274(September 2022):115118. doi: 10.1016/j.engstruct.2022.115118.

- Van Engelen, Niel C. 2015. “Adaptive Characteristics of Fiber-Reinforced Elastomeric Isolators.”
- Van Engelen, Niel C. 2019. “Fiber-Reinforced Elastomeric Isolators: A Review.” *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 125(March). doi: 10.1016/j.soildyn.2019.03.035.
- Van Engelen, Niel C., Peyman M. Osgooei, Michael J. Tait, and Dimitrios Konstantinidis. 2014. “Experimental and Finite Element Study on the Compression Properties of Modified Rectangular Fiber-Reinforced Elastomeric Isolators (MR-FREIs).” *Engineering Structures* 74:52–64. doi: 10.1016/j.engstruct.2014.04.046.
- Galano, Simone, Andrea Calabrese, Daniele Losanno, Giorgio Serino, and Salvatore Strano. 2022. “Tuning the Lateral Response of Unbonded Fiber Reinforced Elastomeric Isolators (U-FREIs) through Horizontal Holes: Experimental and Numerical Findings.” *Composite Structures* 289(March):115454. doi: 10.1016/j.compstruct.2022.115454.
- H. Toopchi-Nezhad , M.J. Tait, and R. G. Drysdale. 2010. “STIFFNESS ANALYSIS OF FIBER-REINFORCED RUBBER ISOLATORS UNDER COMPRESSIVE LOADS: A FINITE ELEMENT APPROACH H. Toopchi-Nezhad 1 , M.J. Tait 2 , and R.G. Drysdale 3.”
- Habieb, A B. 2020. “Recycled Rubber-Fiber Reinforced Elastomeric Isolators for Seismic Protection in Developing Countries.”
- Habieb, A. B., A. Formisano, G. Milani, and G. Pianese. 2022. “Seismic Performance of Unbonded Fiber-Reinforced Elastomeric Isolators (UFREI) Made by Recycled Rubber. Influence of Suboptimal Crosslinking.” *Engineering Structures* 256(February):114038. doi: 10.1016/j.engstruct.2022.114038.
- Habieb, Ahmad Basshofi. 2020. *Recycled Rubber-Fiber Reinforced Elastomeric Isolators for Seismic Protection in Developing Countries*.
- Habieb, Ahmad Basshofi, Marco Valente, and Gabriele Milani. 2019. “Implementation of a Simple Novel Abaqus User Element to Predict the Behavior of Unbonded Fiber Reinforced Elastomeric Isolators in Macro-Scale Computations.” *Bulletin of Earthquake Engineering* 17(5):2741–66. doi: 10.1007/s10518-018-00544-6.
- Herrmann, Leonard R., Ramin Haniidi, Farid Shafagh-Nobari, and Ananth Ramaswamy. 1989. “NONLINEAR BEHAVIOR OF ELASTOMERIC BEARINGS. I I: F E ANALYSIS AND VERIFICATION.” 114(11):1831–53.
- Kelly, James M., and Dimitrios A. Konstantinidis. 2011. *Mechanics of Rubber Bearings for Seismic and Vibration Isolation Red Box Rules Are for Proof Stage Only. Delete Before Final Printing. Mechanics of Rubber Bearings for Seismic and Vibration Isolation*.

- Kim, Nam-Ho, and Bhavani V Sankar. 2008. *Introduction to Finite Element Analysis and Design*.
- Koo, Gyeong Hoi, Jin Young Jung, Jin Hyeong Lee, Tae Myung Shin, and Jin Young Park. 2020. "Development of Small-Sized Lead Inserted Laminated Rubber Bearing for Nuclear Component Seismic Isolation." *Energies* 13(12). doi: 10.3390/en13123193.
- Losanno, D., A. Calabrese, I. E. Madera-Sierra, M. Spizzuoco, J. Marulanda, P. Thomson, and G. Serino. 2019. "Recycled versus Natural-Rubber Fiber-Reinforced Bearings for Base Isolation: Review of the Experimental Findings." *Journal of Earthquake Engineering* 26(4):1921–40. doi: 10.1080/13632469.2020.1748764.
- Losanno, Daniele, Ingrid E. Madera Sierra, Mariacristina Spizzuoco, Johannio Marulanda, and Peter Thomson. 2019a. "Experimental Assessment and Analytical Modeling of Novel Fiber-Reinforced Isolators in Unbounded Configuration." *Composite Structures* 212(October 2018):66–82. doi: 10.1016/j.compstruct.2019.01.026.
- Losanno, Daniele, Ingrid E. Madera Sierra, Mariacristina Spizzuoco, Johannio Marulanda, and Peter Thomson. 2019b. "Experimental Assessment and Analytical Modeling of Novel Fiber-Reinforced Isolators in Unbounded Configuration." *Composite Structures* 212:66–82. doi: 10.1016/j.compstruct.2019.01.026.
- Losanno, Daniele, Ingrid E. Madera Sierra, Mariacristina Spizzuoco, Johannio Marulanda, and Peter Thomson. 2019c. "Experimental Assessment and Analytical Modeling of Novel Fiber-Reinforced Isolators in Unbounded Configuration." *Composite Structures* 212(October 2018):66–82. doi: 10.1016/j.compstruct.2019.01.026.
- De Luca, Antonello, and Laura Giovanna Guidi. 2019. "State of Art in the Worldwide Evolution of Base Isolation Design." *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 125(June):105722. doi: 10.1016/j.soildyn.2019.105722.
- Madera Sierra, Ingrid. 2018. *Desarrollo Tecnológico de Un Aislador Sísmico de Bajo Costo Para Edificaciones Bajas*.
- Madera Sierra, Ingrid E., Daniele Losanno, Salvatore Strano, Johannio Marulanda, and Peter Thomson. 2019. "Development and Experimental Behavior of HDR Seismic Isolators for Low-Rise Residential Buildings." *Engineering Structures* 183(September 2018):894–906. doi: 10.1016/j.engstruct.2019.01.037.
- Madera Sierra, Ingrid Elizabeth. 2018. "DESARROLLO TECNOLÓGICO DE UN AISLADOR SÍSMICO DE BAJO COSTO PARA EDIFICACIONES BAJAS." *Journal of Materials Processing Technology*.
- Madera Sierra, Ingrid Elizabeth, Johannio Marulanda Casas, Peter Thomson Roach, Daniele Losanno, Miguel Ángel Gómez, and Lizeth Fernanda Ortega Escobar. 2020. *ECO-AISLADORES: Aisladores Sísmicos Eco-Amigables Para La Mitigación de Riesgo En Infraestructura*.

- Madera Sierra, Ingrid, Johannio Marulanda Casas, Peter Thomson, Daniele Lossano, Miguel Angel Gómez, and Lizeth Fernanda Ortega. 2020. “ECO-AISLADORES: Aisladores Sísmicos Eco-Amigables Para La Mitigación de Riesgo En Infraestructura. 2020.”
- Miura, Takumi, and Yuuki Ikeda. 2008. *Earthquake Engineering: New Research*.
- Molinares, N., and A. H. Barbat. 1994. “Edificios Con Aislamiento de Base No Lineal.”
- Montuori, Giovanni Maria, Elena Mele, Giuseppe Marrazzo, Giuseppe Brandonisio, and Antonello De Luca. 2016. “Stability Issues and Pressure–Shear Interaction in Elastomeric Bearings: The Primary Role of the Secondary Shape Factor.” *Bulletin of Earthquake Engineering* 14(2):569–97. doi: 10.1007/s10518-015-9819-x.
- Moon, Byung Young, Gyung Ju Kang, Beom Soo Kang, and James M. Kelly. 2002. “Design and Manufacturing of Fiber Reinforced Elastomeric Isolator for Seismic Isolation.” *Journal of Materials Processing Technology* 130–131:145–50. doi: 10.1016/S0924-0136(02)00713-6.
- Naeim, Farzad, and James Kelly. 1999. *Design of Seismic Isolated Structures: From Theory to Practice*. John Wiley & Sons, Inc.
- Van Ngo, Thuyet, Anjan Dutta, and Sajal K Deb. 2017. “Evaluation of Horizontal Stiffness of Fibre-Reinforced Elastomeric Isolators.” *Earthquake Engineering Structural Dynamics*. doi: 10.1002/eqe.2879.
- Van Ngo, Thuyet, Anjan Dutta, and Sajal K. Deb. 2017. “Evaluation of Horizontal Stiffness of Fibre-Reinforced Elastomeric Isolators.” *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 46(11):1747–67. doi: 10.1002/eqe.2879.
- NOAA. 2023. “Sismos En Los Últimos 500 Años En América Del Sur.” 2023. Retrieved (<https://www.ngdc.noaa.gov/hazel/view/hazards/earthquake/event-data?maxEqMagnitude=9.9&maxYear=2023&minDeathsAmountOrder=3&minYear=1523&minDeaths=100&minEqMagnitude=6&maxDeathsAmountOrder=4®ion=160&minDamageAmountOrder=3&minDeathsAmountOrderTotal=4>).
- OPS. 2021. “Acerca de Los Terremotos.” Emergencias en Salud.
- Ortega Escobar, Lizeth Fernanda. 2021. “Prototipos de Aisladores Sísmicos Con Matriz de Caucho Reciclado Para La Mitigación de Riesgo En Estructuras.”
- Ortega, L. F., M. Z. Herazo, A. R. Ortiz, P. Thomson, and J. Marulanda. 2023. “Performance of Prototype Seismic Isolators Reinforced with Fiber and a Recycled Rubber Tire Matrix.” *Engineering Structures* 278(October 2022):115422. doi: 10.1016/j.engstruct.2022.115422.
- Osgooui, Peyman M., Michael J. Tait, and Dimitrios Konstantinidis. 2014. “Finite Element Analysis of Unbonded Square Fiber-Reinforced Elastomeric Isolators (FREIs) under

- Lateral Loading in Different Directions.” *Composite Structures* 113(1):164–73. doi: 10.1016/j.compstruct.2014.02.033.
- Petrosian, Levon, and Vladimir Ambartsumian. 2020. *Static and Dynamic Analysis of Engineering Structures: Incorporating the Boundary Element Method*.
- Przydatek, Grzegorz, Grzegorz Budzik, and Małgorzata Janik. 2022. “Effectiveness of Selected Issues Related to Used Tyre Management in Poland.” *Environmental Science and Pollution Research* 29(21):31467–75. doi: 10.1007/s11356-022-18494-7.
- Rivas, Faider, Alex Meza, Liseth Muñoz, Juan Rodríguez, Ingrid Madera Sierra, Edwin Patino, M. Salmerón Becerra, and S. Dyke. 2024. *Enhancement Alternatives for Mechanical Properties of Recycled Rubber Seismic Isolators through Modification of Reinforcement and Interlayer Adhesion*.
- Rivas Ordoñez, Faider S., Alex O. Meza Munoz, Ingrid E. Madera Sierra, Manuel A. Rojas Manzano, Edwin D. Patino, Manuel I. Salmerón Becerra, and Shirley J. Dyke. 2024. “Alternatives for Enhancing Mechanical Properties of Recycled Rubber Seismic Isolators.” *Polymers* 16(16). doi: 10.3390/polym16162258.
- Rodriguez, Juan S., Diego D. Pérez, Liseth A. Muñoz, Faider S. Rivas, Alex Meza, Ingrid E. Madera Sierra, and Orlando Cundumí. 2024. *Properties of a Recycled Rubber Material in Different Deformation Modes-Experimental and FEM Study*.
- Ruano, Pablo Castillo, and Alfred Strauss. 2021. “Finite Element Analysis for Nonlinear Unbonded Circular Fiber-Reinforced Elastomeric Bearings.”
- Salomón, O., Sergio Horacio Oller Martinez, and Horia Alejandro Barbat Barbat. 2000. *Modelo Numérico de Elastómeros Multi-Fase y Su Aplicación al Análisis de Estructuras Con Aislamiento Sísmico*.
- Saremi, Emad, and Hamid Toopchi-Nezhad. 2021a. “Finite Element Modeling of Horizontal Load-Displacement Hysteresis Loops in Unbonded Elastomeric Isolators.” *Structures* 34(September):2987–95. doi: 10.1016/j.istruc.2021.08.095.
- Saremi, Emad, and Hamid Toopchi-Nezhad. 2021b. “Finite Element Modeling of Horizontal Load-Displacement Hysteresis Loops in Unbonded Elastomeric Isolators.” *Structures* 34:2987–95. doi: 10.1016/j.istruc.2021.08.095.
- Saremi, Emad, and Hamid Toopchi-Nezhad. 2021c. “Finite Element Modeling of Horizontal Load-Displacement Hysteresis Loops in Unbonded Elastomeric Isolators.” *Structures* 34(September):2987–95. doi: 10.1016/j.istruc.2021.08.095.
- Sierra, Ingrid E. Madera, Universidad Valle, and Universidad Valle. 2019. “Matrix and Reinforcement Materials for Low- Cost Building Isolators : An Overview of Results from Experimental Tests and Numerical Simulations.”

- Spizzuoco, Mariacristina, Andrea Calabrese, and Giorgio Serino. 2014. “Innovative Low-Cost Recycled Rubber-Fiber Reinforced Isolator: Experimental Tests and Finite Element Analyses.” *Engineering Structures* 76:99–111. doi: 10.1016/j.engstruct.2014.07.001.
- Tan, Ping, Kai Xu, Bin Wang, Chia Ming Chang, Han Liu, and Fu Lin Zhou. 2014. “Development and Performance Evaluation of an Innovative Low-Cost Seismic Isolator.” *Science China Technological Sciences* 57(10):2050–61. doi: 10.1007/s11431-014-5662-6.
- Thuyet, N. G. O. V. A. N. 2017. “UN-BONDED FIBRE REINFORCED ELASTOMERIC.” (April).
- Toopchi-Nezhad, Hamid, Michael J. Tait, and Robert G. Drysdale. 2011. “Bonded versus Unbonded Strip Fiber Reinforced Elastomeric Isolators: Finite Element Analysis.” *Composite Structures* 93(2):850–59. doi: 10.1016/j.compstruct.2010.07.009.
- Tsai, Hsiang-Chuan, and James Marshall Kelly. 2001. “Stiffness Analysis of Fiber-Reinforced Elastomeric Isolators.” *Pacific Earthquake Engineering Research Center* (May).
- UN. 17AD. “Objetivos Para Transformar Nuestro Mundo.”
- Wang, Hao, Haoran Mu, Xiaoxia Guo, Yunfei Zhang, Haowei Ji, Chao Luo, Huaiping Feng, and Donglin Liu. 2023. “Experimental and Numerical Simulation Study on Mechanical Properties of Fiber-Reinforced Plastic Seismic Isolator.” *Engineering Structures* 275(PA):115108. doi: 10.1016/j.engstruct.2022.115108.

11. GLOSARIO DE TÉRMINOS ESPECIALES

- **Modelo constitutivo:** en ingeniería, un modelo constitutivo es una representación matemática que describe el comportamiento mecánico de un material. Se utiliza para predecir cómo responderá el material bajo diferentes condiciones de carga, deformación y temperatura. Estos modelos se basan en principios físicos y se utilizan en análisis estructurales y simulaciones numéricas para predecir el comportamiento de materiales en diferentes situaciones.
- **Hiperelasticidad:** es un tipo de comportamiento mecánico de los materiales que muestra una respuesta no lineal y reversible ante la aplicación de una carga. Los materiales hiperelásticos tienen una capacidad significativa para almacenar y recuperar energía elástica durante la deformación. Se utilizan modelos constitutivos específicos, como el modelo de Mooney-Rivlin o el modelo de Ogden, para describir este comportamiento en materiales como elastómeros y cauchos.
- **Viscoelasticidad:** se refiere al comportamiento mecánico de los materiales que exhiben tanto características elásticas como viscosas. Estos materiales muestran una respuesta dependiente del tiempo y pueden deformarse tanto de forma elástica como viscosa. Los materiales viscoelásticos tienen una respuesta elástica inmediata ante una carga, pero también exhiben una relajación gradual de la tensión a lo largo del tiempo. La modelación viscoelástica se utiliza en el estudio de materiales como polímeros y algunos metales bajo condiciones de carga dinámica o a largo plazo.
- **Aislador:** dispositivo o componente utilizado para mitigar los efectos de los terremotos en las estructuras. Los aisladores sísmicos se instalan entre la estructura y su base de apoyo para reducir las fuerzas transmitidas a la estructura durante un evento sísmico. Los aisladores pueden ser de diferentes tipos, como aisladores elastoméricos (hechos de materiales de goma o caucho), aisladores de fricción o aisladores de deslizamiento. Estos dispositivos permiten la deformación controlada y la disipación de energía para proteger la estructura y sus ocupantes.
- **RU-FREI:** Aislador sísmico desconectado de caucho reciclado fibra reforzado
- **U-FREI:** Aislador sísmico elastomérico desconectado fibra reforzado
- **FREI:** Aislador sísmico elastomérico fibra reforzado

- **Refuerzo:** se refiere a la incorporación de materiales adicionales en una estructura o componente para mejorar sus propiedades mecánicas, como la resistencia, rigidez o capacidad de deformación. El refuerzo puede realizarse utilizando diversos materiales, como fibras (por ejemplo, fibras de carbono o vidrio), barras de acero u otros elementos que proporcionen una mayor resistencia estructural y mejoren el rendimiento bajo cargas estáticas o dinámicas.
- **Elementos finitos:** Los elementos finitos son una técnica utilizada en el análisis estructural y la modelación numérica para aproximar y resolver problemas complejos mediante la discretización del dominio en elementos más pequeños y manejables. En esta técnica, el dominio se divide en una malla de elementos finitos, como triángulos o cuadriláteros en 2D, o tetraedros o hexaedros en 3D. Estos elementos se utilizan para representar y analizar el comportamiento de la estructura o componente en función de las ecuaciones de equilibrio y las condiciones de carga aplicadas. Los elementos finitos permiten el cálculo de respuestas como tensiones, deformaciones, desplazamientos y otros parámetros de interés.
- **Modelación numérica:** La modelación numérica se refiere al proceso de utilizar técnicas y métodos matemáticos para representar y analizar fenómenos y comportamientos físicos en forma de modelos computacionales. En ingeniería mecánica y sísmica, la modelación numérica implica la formulación matemática de las ecuaciones que describen el comportamiento de una estructura o componente, y su resolución mediante algoritmos y cálculos computacionales.
- **Factor de forma:** parámetro que indica la forma y geometría de un componente o estructura en relación con su respuesta ante cargas aplicadas. En el contexto de la ingeniería sísmica, el factor de forma puede utilizarse para evaluar la relación entre la altura y el diámetro de un aislador, por ejemplo, y cómo esto afecta su rigidez y comportamiento estructural.