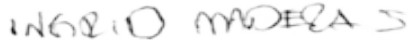


**MEJORAMIENTO DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE AISLADORES SÍSMICOS DE CAUCHO RECICLADO
MODIFICANDO EL REFUERZO Y LA ADHERENCIA ENTRE CAPAS**

FAIDER SEBASTIAN RIVAS ORDOÑEZ

Nota de Aceptación

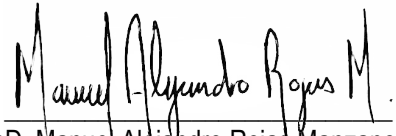
Certificamos que el presente Trabajo de Grado Satisface, en alcances y calidad, todos los requisitos que demanda un Trabajo de Grado de Maestría en Ingeniería Civil y se concede la mención de honor al proyecto de grado.



PhD. Ingrid Elizabeth Madera Sierra
Directora



PhD. Orlando Cundumi Sanchez
Jurado 1



PhD. Manuel Alejandro Rojas Manzano
Codirector



MSc. Maria Victoria Mondragon
Jurado 2

Aprobado en cumplimiento de los requisitos exigidos por la Pontificia Universidad Javeriana Cali, para optar el título de Magister en Ingeniería Civil.

HERNÁN CAMILO ROCHA NIÑO Ph. D.
Decano Facultad de Ingeniería y Ciencias

JUAN CARLOS MARTÍNEZ ARIAS
Director Posgrados de Ingeniería y Ciencias

Santiago de Cali, 19 de Junio, 2024



Pontificia Universidad
JAVERIANA
Cali

**MEJORAMIENTO DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE
AISLADORES SÍSMICOS DE CAUCHO RECICLADO MODIFICANDO
EL REFUERZO Y LA ADHERENCIA ENTRE CAPAS**

Presentado por:

FAIDER SEBASTIÁN RIVAS ORDOÑEZ

Directora: Dra. Ingrid E. Madera Sierra

Codirector: Dr. Manuel Alejandro Rojas

Pontificia Universidad Javeriana Cali

Facultad de Ingeniería y Ciencias

2024

TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN	6
2.	DEFINICIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	8
2.1.	Planteamiento del Problema	8
3.	OBJETIVOS DEL PROYECTO	12
3.1.	Objetivo general.....	12
3.2.	Objetivos específicos	12
4.	JUSTIFICACIÓN	13
5.	MARCO DE REFERENCIA	15
5.1.	Antecedentes del aislamiento sísmico	15
5.2.	Estado del arte.....	16
5.3.	Marco Teórico.....	25
5.3.1.	Sobre aislamiento sísmico.....	25
6.	MATERIALES Y PROCEDIMIENTOS	30
6.1.	Propiedades mecánicas y selección del refuerzo	30
6.2.	Propiedades Mecánicas del Adhesivo para la interfaz Refuerzo - Caucho Reciclado 32	
6.2.1.	Ensayo de Adherencia por Cortante	33
6.2.2.	Ensayo de Adherencia por Tracción.....	34
6.2.3.	Propiedades Mecánicas y Selección de Adhesivos.....	34
6.3.	Fabricación del Prototipo de Aislador Sísmico	37
6.3.1.	Proceso de Fabricación Monolítico	37
6.3.2.	Proceso de Fabricación por Capas	39
6.4.	Propiedades Mecánicas de Prototipos de Aisladores Sísmicos	40

6.4.1.	Evaluación del Desempeño en la Dirección Vertical	40
6.4.2.	Evaluación del Desempeño en la Dirección Horizontal	41
7.	RESULTADOS Y DISCUSION	43
7.1.	Compresión Cíclica.....	43
7.2.	Cortante Cíclica	44
8.	CONCLUSIONES.....	49
9.	PERSPECTIVAS	51
10.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	52

TABLA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Tratamiento de adhesivo. Fuente: Moon et al. (2002).....	17
Ilustración 2. Fibra de vidrio retorcida bidireccional. Fuente: Mordini & Strauss, (2008)...	17
Ilustración 3. Configuración de fibras de carbono. Fuente: Russo et al (2013)	18
Ilustración 4. Malla de fibra de carbono con termoplástico. Fuente: Karimzadeh Naghshineh et al. (2014).....	19
Ilustración 5. Núcleos de poliuretano en aislador sísmico. Fuente: Riyadh et al. (2023).....	21
Ilustración 6. Láminas de plástico. Fuente: Wang et al. (2023)	22
Ilustración 7. Reducción de fuerzas en la base por aislador sísmico. Fuente: Basar et al. (2021)	26
Ilustración 8. Diagrama de flujo para el diseño de un aislador HDR. Fuente: Ferrer Gallegos (2016).....	27
Ilustración 9. Gráfica para el cálculo del módulo de elasticidad normalizado (E_{fc}). Fuente: Kelly y Konstantinidis (2011).....	28
Ilustración 10. Refuerzos: a) HRA, b) TR, c) GM, d) GO, e) FP, f) FVE, g) FB y h) PLE..	30
Ilustración 11. a) Ensayo de tracción y b) Gráficos de tensión-deformación de refuerzos ...	31
Ilustración12. Probetas: a) Ensayo de tracción por adherencia y b) Probetas para ensayo de adherencia por corte.....	35
Ilustración13. Tipos de fallo: a) RT, b) R y c) RA	35
Ilustración14. Adherencia monolítica bajo presión térmica.	36
Ilustración15. Proceso de fabricación: a) prensa térmica, b) fundición en molde de caucho, c) refuerzo con agujeros, d) refuerzo sin agujeros, y e) producto final	38
Ilustración16. Proceso de fabricación del prototipo por capas: a) capa de caucho reciclado, b) capa de caucho reciclado y refuerzo FVE sin agujeros, y c) prototipo final por capas.	39
Ilustración17. a) Montaje ensayo de compresión ciclica y b) Protocolo de compresión cíclica	40

Ilustración18. a) Protocolo de cortante cíclica y b) Ensayo de cortante cíclica de ensamblaje (Patiño Reyes, 2022).....	42
Ilustración19. a) Falla por fricción en la base (FF) y b) Falla por adherencia (AF).....	45
Ilustración20. Condición de roll-over en a) CAPAS CA-PFVE y b) PF-PAFVE15.....	46
Ilustración 21.Histeresis a) CA-PFVE Layers y b) PF_PFVE15	48
Ilustración 22. Rigidez horizontal para diferentes porcentajes de deformación a) CA-PFVE Layers y b) PF_PFVE15	48
Ilustración 23. Amortiguamiento para diferentes porcentajes de deformación a) CA-PFVE Layers y b) PF_PFVE15	48

1. INTRODUCCIÓN

El aislamiento sísmico constituye una estrategia de diseño estructural destinada a mitigar o minimizar los daños provocados por los movimientos telúricos, logrando la disipación controlada de la energía generada por los terremotos mediante el empleo de dispositivos de aislamiento sísmico, reforzados con materiales rígidos como el acero (conocidos como SREI) o flexibles como las fibras (FREI) (Naeim y Kelly, 1999). Es así, que la implementación de refuerzos flexibles en los aisladores ha introducido mejoras significativas en términos de reducción de costos y peso, lo que ha resultado en una mayor accesibilidad y facilidad en el proceso constructivo de las estructuras (B. Y. Moon et al., 2002).

Dentro de esta categoría, las fibras emergen como elementos de particular interés, ya que cada una de ellas presenta características específicas que las hacen apropiadas para su estudio y aplicación en el campo de la ingeniería estructural. Ejemplos comunes de fibras utilizadas con frecuencia incluyen las de vidrio, carbono y nylon, seleccionadas debido a sus propiedades mecánicas como alto módulo de elasticidad, usos específicos en construcción y su costo de adquisición (Russo et al., 2013). En particular, los dispositivos con este tipo de refuerzo, que se caracterizan por su mayor flexibilidad y exhiben una rigidez vertical similar a la de los SREI, contribuyen a una reducción del abombamiento lateral del elastómero, haciendo que el aislador tenga deformaciones limitadas ante las cargas de compresión (Strauss et al. 2014). Particularmente en Colombia, investigaciones recientes han evidenciado el desarrollo de FREIs empleando fibra de poliéster, según un estudio conducido por Losanno et al. (2019). Este estudio ilustra que, al usar dicho refuerzo, se obtuvo una rigidez tanto en la dimensión vertical como horizontal comparable a aquella proporcionada por la fibra de carbono, pero con un coste significativamente menor. No obstante, cuando esta fibra de poliéster se incorporó en prototipos de aisladores sísmicos con una matriz de caucho reciclado, las propiedades mecánicas, tanto verticales como horizontales, evidenciaron una disminución, tal como fue reportado por Ortega et al. (2023).

De manera similar, los dispositivos al ser compuestos por estratos de fibra y caucho, se requiere una adhesión apropiada en la interfaz correspondiente con el fin de garantizar el funcionamiento adecuado del conjunto de materiales que lo integran. Tradicionalmente, se ha empleado el adhesivo conocido como Chemlok con este propósito; no obstante, es imperativo someterlo a un proceso de curado térmico, lo que implica una prolongación en el tiempo del

proceso y una disminución de su practicidad, como se ha documentado previamente por Tan et al (2021).

Por consiguiente, se suscita la necesidad de explorar nuevos materiales que satisfagan los requisitos mencionados y que, además, sean de fácil obtención. Es en este contexto que la presente investigación se propone abordar el análisis del desempeño de diversos tipos de refuerzos flexibles y adhesivos a través de ensayos mecánicos y prototipos que puedan emplearse en dispositivos aisladores sísmicos, con el propósito de evaluar su eficacia y determinar cuál de ellos resulta más idóneo en la aplicación de tales dispositivos.

2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

2.1. Planteamiento del Problema

En la actualidad existen metodologías de diseño con el fin de brindar estructuras óptimas y resistentes ante un evento sísmico, como es el caso de las que utilizan disipadores de base. No obstante, en las edificaciones que se construyen en la actualidad los dispositivos de aislamiento sísmico no son frecuentemente implementados ya que son comúnmente utilizados en centros de emergencia como hospitales, puentes y estructuras con contenidos valiosos o funcionales, tales como centros de datos, instalaciones de comunicaciones, locales de fabricación de alta tecnología y museos, por lo cual, en regiones como Colombia, donde la mayoría de construcciones son realizadas basándose en el conocimiento empírico y tradicional presentan graves daños estructurales (Losanno et al., 2021; Madera et al., 2019; B. Moon et al., 2002). En relación con lo anterior, se ha encontrado que desde el año 2011 hasta 2021 se han presentado 17653 sismos de magnitud entre 5.0 a 5.9; 1424 entre 6.0 a 6.9; 149 entre 7.0 a 7.9 y 13 de 8 en adelante, dejando como resultado más de 40000 muertes en los últimos años (UCGS, 2023). Adicionalmente, según el Servicio Geológico Colombiano, desde 1833 hasta 2021, Colombia ha experimentado alrededor de 34 terremotos con magnitudes superiores a 6,0. Algunos de los terremotos más mortales en la historia de Colombia incluyen el terremoto de Cúcuta de 1875 con magnitud de 6,0 que causó entre 500 y 1.000 muertes; el de Popayán de 1983 con una magnitud 5,8 con al menos 250 muertes y el de Armenia de 1999 con 1185 muertes.

Ahora bien, la adaptación de estos dispositivos en naciones en vías de desarrollo ha planteado desafíos significativos, cuyo origen radica en aspectos económicos y técnicos (Spizzuoco et al., 2014). En particular, unos de los obstáculos sobresalientes se encuentran en el elevado costo y peso asociados a estos aisladores. En efecto, un solo aislador puede alcanzar un peso de una tonelada o incluso exceder este umbral, según lo documentado por Kelly (2002). Este excesivo peso se atribuye principalmente al empleo de placas de acero en el proceso de reforzamiento de los sistemas de aislamiento sísmico (SREIs), lo cual implica una manufactura prolongada y costosa, tal como fue indicado previamente por Kelly (1999).

Cabe destacar que la utilización de acero conlleva consecuencias ambientales significativas. En el año 2019, la producción de acero alcanzó un promedio de 240 kg por habitante en el planeta. Además, la demanda global de acero es tan sustancial que, en el año 2018, la industria siderúrgica

por sí sola contribuyó con aproximadamente el 25% de las emisiones industriales globales de dióxido de carbono (CO₂). Esto se debe al hecho de que, por cada tonelada de acero manufacturada, se liberan aproximadamente 1,8 toneladas de CO₂, de acuerdo con datos proporcionados por Ciencia del Clima (2022). Además, según un informe de la Organización Mundial del Comercio (OMC) publicado en 2019, se tiene un alto consumo energético y se estima que para producir una tonelada de acero se requiere el consumo entre 15 y 25 megavatios/hora de energía eléctrica, lo que representa una importante carga para la red eléctrica traduciéndose en costos más elevados al momento de adquisición del material.

En reemplazo del acero, la incorporación de refuerzos flexibles en los aisladores sísmicos ha sido objeto de estudio en los últimos años. Sin embargo, se han encontrado problemas en el comportamiento mecánico de los materiales utilizados para el refuerzo de estos dispositivos. Se ha observado que el uso de fibras de vidrio puede causar una reducción significativa en la rigidez vertical de los aisladores, lo que puede afectar su capacidad para soportar cargas sísmicas. Según los estudios realizados por Calabrese *et al* (2021) Esto se debe a la baja resistencia a la tracción de las fibras de vidrio en comparación con otros materiales de refuerzo. Así mismo, se ha encontrado que el comportamiento mecánico de los aisladores reforzados con fibras de nylon no brindan una óptima estabilidad vertical, Madera Sierra et al (2019), revelaron que debido a la alta flexibilidad del material, este no proporciona un valor de rigidez vertical alto, a comparación de una fibra de carbono. En un estudio reciente, Ortega (2022) llevó a cabo la fabricación de prototipos de dispositivos utilizando fibra de poliéster bidireccional. En contraste con investigaciones anteriores como la realizada por Losanno et al (2019), se optó por utilizar caucho reciclado en lugar de caucho natural. Los resultados experimentales revelaron notables diferencias en la rigidez vertical en comparación con los valores teóricos, con una disparidad del 49%. Este hallazgo representa una desviación significativa con respecto a las expectativas originales. Además, se observó que el porcentaje de deformación residual después de ensayos de compresión fue un 18% mayor en comparación con los resultados previamente reportados por Madera (2018). Asimismo, en cuanto a su respuesta horizontal, los prototipos solo alcanzaron un rango de deformación del 50%. Esta limitación se debe a que, conforme a los datos presentados por Losanno et al. (2019), la rigidez horizontal experimentó un incremento significativo, pasando de 0,08 kN/mm a 0,5 kN/mm según lo reportado por Ortega (2022) .

Por otro lado, en Colombia fibras como la de carbono, material que ha dado resultados en cuanto comportamiento mecánico vertical y horizontal mejor que el uso de acero, puede presentar varios problemas, donde se incluye en primera mano la importación del material de alta calidad que es costoso debido a los aranceles de importación, impuestos y otros cargos adicionales que se aplican a los productos importados, lo que afecta la rentabilidad de los proyectos (Corporación Legal Colombia, 2021); segundo, las barreras comerciales también dificultan la cantidad que se pueden importar o requisitos de certificación específicos que deben cumplirse antes de que se permita la importación; tercero, la disponibilidad puede ser limitada en el mercado colombiano, restringiendo la capacidad de los ingenieros y constructores para utilizar en aisladores sísmicos y en algunos casos, los procesos de licitación pueden requerir que los contratistas utilicen materiales nacionales para la construcción, lo que puede limitar la capacidad de importar (García-García et al., 2018).

Considerando que los dispositivos FREI se componen de capas superpuestas, la adherencia entre estas capas se convierte en un aspecto crucial para garantizar la integridad de los componentes de caucho y fibra durante su aplicación. No obstante, es importante destacar que, en investigaciones relacionadas con el desarrollo de aisladores sísmicos, la evaluación detallada de esta propiedad a través de ensayos experimentales no ha sido suficientemente abordada en la literatura (Calabrese et al., 2015, 2019; Habieb et al., 2019; Losanno et al., 2019; Riad et al., 2023a; Spizzuoco et al., 2014). Por ejemplo, en el estudio de Habieb et al (2019), se emplearon modelos numéricos que asumieron una adherencia perfecta entre capas, lo que resalta la necesidad imperativa de una evaluación experimental en condiciones realistas.

En este contexto, cabe señalar que algunas investigaciones previas han utilizado adhesivos que requieren un proceso de curado térmico para alcanzar su resistencia máxima. Autores como Losanno et al (2020) han desarrollado prototipos utilizando este tipo de adhesivo a base de poliuretano. Sin embargo, es importante considerar que el tiempo necesario para el proceso de curado y fabricación es considerablemente prolongado, lo que conlleva a un incremento en el consumo de energía y, por ende, a costos adicionales significativos en la producción de estos dispositivos.

Por lo tanto, los problemas encontrados sugieren la necesidad de una evaluación más detallada y un análisis exhaustivo de los materiales y métodos empleados en la fabricación de estos

dispositivos, con el fin de comprender mejor las causas subyacentes y mejorar la eficacia de los dispositivos de aislamiento sísmico.

3. OBJETIVOS DEL PROYECTO

A continuación, se describen los objetivos que se pretenden desarrollar con la presente propuesta.

3.1. Objetivo general

Mejorar el comportamiento mecánico de aisladores sísmicos de caucho reciclado a través de la modificación del refuerzo y adherencia entre capas

3.2. Objetivos específicos

El objetivo general se pretende alcanzar cuando se desarrollen los siguientes objetivos específicos:

- Analizar diferentes tipos de refuerzo para seleccionar el que permita mejoramiento de la rigidez vertical y horizontal de los dispositivos de aislamiento sísmico
- Evaluar un adhesivo que permita garantizar una unión adecuada entre el refuerzo propuesto y la matriz de caucho reciclado de los aisladores sísmicos.
- Verificar si el material de refuerzo y adhesivo seleccionados, en conjunto con la matriz de caucho reciclado, mejoran las rigideces de los aisladores sísmicos.

4. JUSTIFICACIÓN

Los terremotos, fenómenos resultantes de la liberación súbita de energía acumulada a lo largo de extensos periodos temporales, se caracterizan por su naturaleza impredecible. Sin embargo, las estructuras pueden ser objeto de medidas previsoras con miras a afrontar tales eventualidades. El aislamiento sísmico, un sistema de control estructural que pone énfasis en la capacidad de aislación en la base, emerge como una estrategia eficaz para la significativa reducción de las fuerzas sísmicas incidentes sobre las edificaciones (Palacios Hernández, 2015). Este enfoque no solo atenúa los perjuicios materiales subsiguientes a un evento sísmico, conllevando a una notoria disminución de la contaminación ambiental concomitante a la demolición o colapso de estructuras, sino que también puede minimizar la necesidad de llevar a cabo procesos de rehabilitación o reparación de edificios tras la ocurrencia de un sismo, reduciendo así la utilización de recursos de alto valor, como el cemento y el acero, siendo este último una fuente considerable de emisiones de dióxido de carbono de alcance global (Terán A, 2010).

Los dispositivos de aislamiento sísmico reforzados con fibras (FREIs) se destacan por su alta relación resistencia-peso, lo que permite mejorar la resistencia y rigidez de los aisladores sísmicos sin agregar significativamente peso adicional. Esta característica facilita tanto el diseño como la fabricación, logrando reducciones de peso de hasta un 20% (Den Einde et al., 2003; Riad et al., 2023). Ahora bien, aunque se presente una percepción inicial de costos elevados en estructuras equipadas con estos dispositivos, se ha demostrado que los edificios con aisladores sísmicos (SREIs) pueden reducir los costos totales en un 20% (Chilon Zárate, 2019). Por ejemplo, en Colombia, los FREIs desarrollados por Madera (2018) demostraron una reducción del 45% en costos directos e indirectos.

Ahora bien, la capacidad de cortar estos dispositivos en dimensiones específicas durante la fabricación conlleva a la reducción de costos, eliminando la necesidad de maquinaria y mano de obra adicional (Kelly y Takhirov, 2001). Por ende, la elección de un refuerzo diferente al acero contribuye a la durabilidad de los aisladores sísmicos, ya los materiales mencionados anteriormente son resistentes a la corrosión en la intemperie (Cardona Urrutia, 2016). Esto ha generado un creciente interés en fibras, geotextiles y láminas plásticas, en estos dispositivos esenciales en ingeniería sísmica. Esta mejora resulta en un mejor comportamiento vertical,

reducción del abombamiento lateral del elastómero y una mayor seguridad tanto para las estructuras como para las personas (Strauss et al., 2014).

Al abordar de manera meticulosa el análisis mecánico de la adherencia interlaminar, se facilita la optimización del comportamiento integral del material compuesto. Esta profundización garantiza que el dispositivo opere de forma coordinada y eficaz ante las cargas sísmicas inducidas, tal como lo exponen (Cilento et al., 2021). Por otro aspecto, en las últimas décadas, Colombia ha manifestado un ascenso significativo en el sector textil, afianzándose como un ente relevante en el escenario internacional de fibras. Esta evolución se correlaciona directamente con la profusión de recursos naturales en el país y su histórica tradición en la confección textil, elementos que han catalizado el auge de una industria altamente competitiva tanto en fibras naturales como sintéticas (Castaño et al., 2015). Es imperativo señalar que tal expansión ha repercutido positivamente en variables macroeconómicas, como el Producto Interno Bruto y la tasa de empleabilidad, promoviendo la fortaleza y consolidación de sectores medulares como la manufactura y el comercio, según datos del DANE (2020).

En resumen, la exploración de nuevos materiales como refuerzos flexibles podría beneficiar a la economía colombiana al promover la producción masiva de dispositivos de aislamiento sísmico más eficientes y económicos. Esto no solo reduce costos y aumenta la eficiencia de las estructuras, sino que también contribuye a salvar vidas y proteger el medio ambiente al minimizar los daños materiales y la necesidad de recursos costosos en la reconstrucción posterior a los terremotos. Sin embargo, es fundamental abordar de manera efectiva los desafíos asociados con la elección de materiales apropiados para garantizar la seguridad y eficacia de estos dispositivos.

5. MARCO DE REFERENCIA

5.1. Antecedentes del aislamiento sísmico

Los aisladores sísmicos son dispositivos que se utilizan en la construcción de edificaciones y puentes para disipar y mitigar las fuerzas durante el evento telúrico, protegiendo así las estructuras de los efectos devastadores de los terremotos. El concepto de aislamiento sísmico se remonta al siglo XIX, cuando se utilizaron dispositivos rudimentarios para proteger estructuras de las vibraciones producidas por las locomotoras de vapor (Makris, 2019). Aunque estos mecanismos no eran específicamente para la protección sísmica, sentaron las bases para el desarrollo de los dispositivos modernos. El primer uso conocido de aisladores sísmicos para proteger edificios de terremotos fue en la década de 1960 en Nueva Zelanda, donde se utilizaron rodamientos de plomo y caucho en la construcción del edificio William Clayton (Skinner et al., 1993), estableciendo un avance significativo en la tecnología de aislamiento sísmico y un precursor de los avances ingenieriles que se emplean hoy en día. Así mismo, en 1969 se implementó el uso de caucho como sistema de protección de terremotos en una escuela primaria en Skopje, Yugoslavia (Naeim y Kelly, 1999).

En 1971, el terremoto de San Fernando en California, EE. UU, evidenció la necesidad de mejorar la resistencia sísmica de las estructuras (Makris, 2019). Esto llevó al desarrollo de los aisladores de base de goma laminada con plomo en la década de 1980, que proporcionan una mayor capacidad de deformación y disipación de energía en comparación con los rodamientos de plomo y caucho utilizados anteriormente (Kelly, 1986). Japón, uno de los países más propensos a terremotos del mundo, también ha sido un líder en el desarrollo y aplicación de los dispositivos, donde, en 1990, implementó en numerosos edificios y puentes, incluido el puente Akashi Kaikyō, que es el puente colgante más largo del mundo (Kelly y Konstantinidis, 2011).

En respuesta a las necesidades emergentes de optimización en protección sísmica, surgieron innovaciones en el diseño de aisladores, destacando entre ellos los aisladores tipo péndulo de fricción y los de elastómero reforzado con fibras, los cuales evidenciaron una superioridad en términos de eficacia y seguridad estructural contra sismos (Takewaki, 2009). Cabe destacar que el origen del uso de fibras en carácter de refuerzo data de la década de 1980, período en el cual se intensificó la investigación en polímeros reforzados con fibras (FRP) destinados a aplicaciones en ingeniería civil. Estos composites, integrando fibras de vidrio, carbono, aramida y basalto, fueron

seleccionados atendiendo a sus preeminentes propiedades de resistencia tensil, rigidez y durabilidad, erigiéndose como una opción auspiciosa en el refuerzo de aisladores sísmicos (Hollaway y Head, 2001).

A medida que se aproximaba el cierre de la década de 1990, los aisladores de elastómero reforzados con fibras (FRE) emergieron como un foco de indagación dentro del ámbito de la ingeniería sísmica, puesto que manifestaron atributos mejorados en resistencia y rigidez en comparación con sus homólogos elastoméricos tradicionales (Kelly, 1999). Durante la década de 2010, una serie de investigaciones, tanto experimentales como numéricas, fueron dirigidas a evaluar el comportamiento de estos aisladores bajo cargas sísmicas, consolidando la preponderancia de los FREIs al exhibir capacidades de resistencia y deformabilidad superlativas en contraste con alternativas previas, reforzando su pertinencia en infraestructuras situadas en regiones de intensa sismicidad (Konstantinidis y Kelly, 2014).

5.2. Estado del arte

La incorporación de refuerzos flexibles en aisladores sísmicos representa un avance significativo, especialmente en la optimización del peso y en la eficiencia del proceso de manufactura. Estos refuerzos emulan las características inherentes al acero, pero con la ventaja de presentar un coste reducido y una aplicabilidad ampliada en los dispositivos de aislamiento sísmico. En una investigación conducida por Moon et al. (2002) se procedió a la construcción de prototipos de aisladores sísmicos tanto a escala reducida como a gran escala. Se analizó su comportamiento bidireccional vertical y horizontal al integrar una variedad de refuerzos, incluyendo acero y fibras de poliéster, nylon, vidrio y carbono, consolidados en una matriz de caucho natural. Es relevante señalar que estas fibras fueron sometidas a un tratamiento químico consistente en una inmersión en isocianina y látex de resorcinol formaldehído (RFL) con el objetivo de optimizar la adherencia en la interfaz caucho-fibra, tal como se ilustra en la Ilustración 1. Mediante pruebas de compresión realizadas en tres ciclos de carga consecutivos, el nylon destacó al exhibir una rigidez vertical superior en comparación con el poliéster y el vidrio. No obstante, es imperativo destacar que la fibra de carbono mostró la rigidez vertical más elevada y un nivel de amortiguamiento significativamente destacado, superando incluso en hasta tres veces la eficacia del reforzamiento con acero.

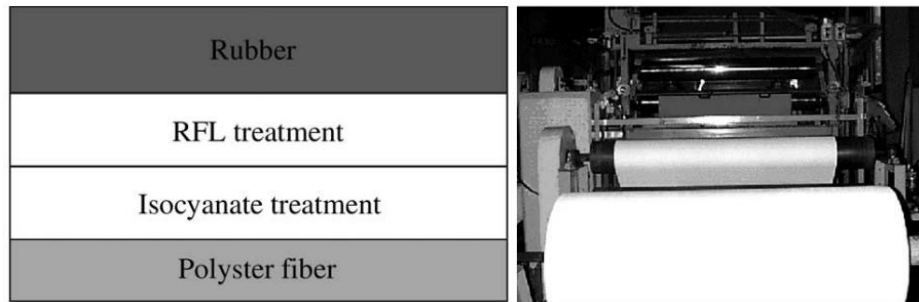


Ilustración 1. Tratamiento de adhesivo. Fuente: Moon et al. (2002)

En una investigación realizada por Mordini & Strauss (2008), se sometieron a prueba prototipos de aisladores sísmicos con caucho natural reforzados con fibra de carbono bidireccional, con el propósito principal de establecer modelos numéricos que se alineen fielmente con los resultados experimentales obtenidos. Para consolidar la unión en la interfaz caucho-refuerzo, se optó por el uso de una resina epóxica. Sin embargo, esta solución no resultó ser químicamente eficaz, observándose un desprendimiento entre las capas. Ante este contratiempo, se llevó a cabo una adaptación mediante el uso de fibra de vidrio retorcida bidireccional con un módulo de elasticidad de 70,000 MPa, conforme a la Ilustración 2. Los ensayos evidenciaron un comportamiento adecuado del dispositivo bajo cargas verticales de 155 kN y desplazamientos horizontales de hasta 100 mm.

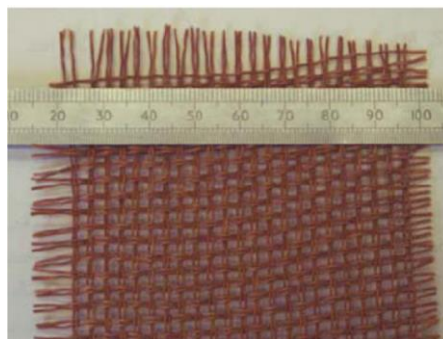


Ilustración 2. Fibra de vidrio retorcida bidireccional. Fuente: Mordini & Strauss, (2008)

Por su parte, Mokhtari Motameni et al. (2013) se centraron en el refuerzo de dispositivos de caucho natural utilizando fibra de carbono de 0.25 mm de espesor. Esta fibra fue impregnada con un adhesivo conocido como chemosil 222 y organoclay, un nanocompuesto integrado en el tejido de carbono con una separación de 3.15 nm. Los ensayos, que se llevaron a cabo aplicando ciclos de carga constantes de 200 kN, arrojaron deformaciones del 150% y una capacidad de amortiguamiento del 13.6%.

En una perspectiva complementaria, Russo et al. (2013) evaluaron prototipos de caucho natural con fibra de carbono, organizados en dos configuraciones: bidireccional (BD) y cuadridireccional (QD), con espesores de 0.112 mm y 0.212 mm respectivamente, como se aprecia en la Ilustración 3. La unión de la interfaz entre el caucho y la fibra se logró mediante vulcanización, sin necesidad de adhesivos. Las pruebas mecánicas, aplicando una compresión de 500 kN a una tasa de 0.01 mm/s, indicaron que los refuerzos cuadridireccionales exhibieron una rigidez vertical superior en comparación con los bidireccionales, con valores de 517,885 N/mm y 361,910 N/mm respectivamente. También se observó una mejora del 8.35% en la disipación de energía de los refuerzos cuadridireccionales.

En otro estudio, Spizzuoco et al. (2014) también optaron por fibra de carbono cuadridireccional. Sin embargo, en contraste con Russo et al. (2013), esta fibra se aplicó a aisladores sísmicos con matriz de caucho reciclado. Para garantizar una adecuada adherencia entre la fibra y la matriz, se utilizó un aglutinante de poliuretano. Bajo una carga vertical monotónica de tres ciclos a 10 Hz de 16.9 kN y tres tipos de historial de tiempo, los resultados reflejaron una rigidez vertical entre 25-38 kN/mm, considerada óptima para estructuras ligeras.

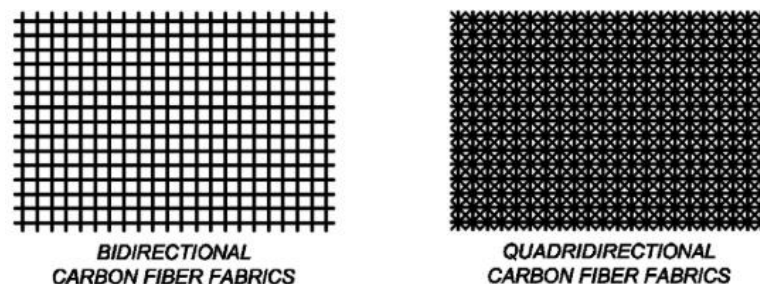


Ilustración 3. Configuración de fibras de carbono. Fuente: Russo et al (2013)

Finalmente, Karimzadeh Naghshineh et al. (2014) enriquecieron la fibra de carbono con un termoplástico con una malla de 4 mm y un espesor igualmente de 4 mm (F1), como se muestra en la Ilustración 4. A uno de los refuerzos de fibras (F1L) se le adicionó un núcleo de plomo. Al someter ambos prototipos a ciclos de bajas cargas verticales, desde 3.45 MPa hasta 6.95 MPa, se determinó que los dispositivos F1L proporcionaron un amortiguamiento adicional del 22% y un incremento en la rigidez vertical del 14% respecto al F1.

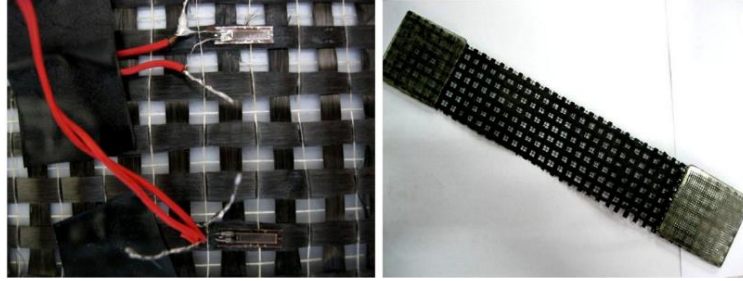


Ilustración 4. Malla de fibra de carbono con termoplástico. Fuente: Karimzadeh Naghshineh et al. (2014)

Tan et al. (2014) innovaron en el desarrollo de aisladores sísmicos de bajo costo al introducir como refuerzo láminas de plástico, técnicamente denominado plástico de ingeniería. Este material compuesto, conformado por una resina de poliéster insaturado y tela de fibra de vidrio, presentó un espesor de 1.40 mm, un módulo de elasticidad de 17420 MPa y una resistencia a la tensión de 304 MPa. En la conceptualización de los dispositivos, se empleó caucho natural y diez láminas con un espesor total de 3 mm. Tras realizar ensayos bajo tres ciclos de carga de 15 MPa, se determinó una rigidez vertical de 320.28 kN/mm y un coeficiente de amortiguación de 23.06%. Notablemente, los dispositivos mostraron deformaciones horizontales que alcanzaron el 300%. De acuerdo con Tan et al. (2014), la eficiencia del dispositivo categoriza al aislador dentro del grupo de alto amortiguamiento (superior al 8%), atribuyendo a las láminas de plástico una superioridad sobre el acero en términos de flexibilidad.

Castillo Ruano y Strauss (2018) sometieron a evaluación una malla de fibra de vidrio con una configuración de 5x5 mm y la compararon con fibra de carbono de 2 mm de espesor, con módulos de elasticidad de 2750N/5cm y 1513.9 MPa, respectivamente. La unión de los materiales se realizó mediante vulcanización caliente, sin adhesivos. Al analizar diferentes niveles de compresión vertical, desde 1 hasta 8 MPa, bajo cargas monótonas a velocidades variables de 1 a 50 kN/s, se observó que la fibra de carbono superó el rendimiento de la fibra de vidrio, alcanzando valores de rigidez vertical de 152.12 kN/mm en comparación con 15.28 kN/mm. Sin embargo, las frecuencias verticales de 34.86 Hz y 31.46 Hz, respectivamente, señaladas por Castillo Ruano y Strauss (2018), exceden de 6 a 17 veces la frecuencia típica del modo horizontal predominante para estructuras de base aislada, que suele ser inferior a 2.0 Hz. A raíz de esto, y considerando el comportamiento vertical, los aisladores pueden clasificarse como adecuados para el aislamiento sísmico.

Losanno et al. (2019) introdujeron un refuerzo con fibra de poliéster bidireccional (T1) y lo compararon con un refuerzo de fibra de carbono bidireccional (T2) en aisladores sísmicos de tamaño real con matriz de caucho natural. Tras ensayos bajo carga monótona de 19 kN, con un incremento de velocidad de 0.01 mm/s, se observó que las deformaciones verticales de ambos tipos eran comparables. No obstante, aunque el amortiguamiento superó el 10% en ambos casos, no hubo diferencias significativas de más del 20%, conforme a lo estipulado en EN 15129.

Sistla y Mohan (2021) presentaron un análisis comparativo de fibras diversas, incluyendo yute, sisal, lino, vidrio, kevlar y carbono, todas con una configuración de malla de 5.5 mm. A través de modelos de elementos finitos, determinaron diversas propiedades mecánicas, concluyendo que la rigidez vertical era constante, independientemente de las propiedades del refuerzo. No obstante, la capacidad de carga vertical varió significativamente, siendo la fibra de carbono la más robusta, con una carga máxima de 60 kN, una rigidez vertical de 75000 N/mm y un coeficiente de amortiguamiento del 13.5%. Sistla y Mohan (2021) propusieron un nuevo parámetro, S_n , que define la relación entre la tensión máxima permisible y la tensión real en la fibra en el desplazamiento máximo esperado. Un valor óptimo para este parámetro se encuentra en el rango de 2-3.

En un estudio realizado por Tan et al. (2021), se investigaron cuatro tipos distintos de refuerzos con el objetivo de evaluar su desempeño en aisladores sísmicos elaborados a partir de caucho natural. Estos refuerzos se clasificaron como: Plástico de madera (W), resina epoxi reforzada con fibra de vidrio (E), poliéster insaturado reforzado con fibra de vidrio (U) y poliacrilato complementado con fibra de vidrio de corte corto (P). Para consolidar la interfaz entre las capas, se empleó el adhesivo Chemlok y un proceso de vulcanización a 130° C. Específicamente, en el caso del prototipo designado como número 4, se optó por no utilizar vulcanización, recurriendo en su lugar a un adhesivo en frío con una resistencia al corte de 0.5 MPa. Durante las pruebas, se sometieron a una carga vertical de 5 MPa con una velocidad de deformación de 0.1 mm/s. Exceptuando el prototipo número 4, los demás manifestaron fallas atribuidas a volcamiento, aunque no presentaron inconvenientes con la adherencia (E, U y P). En contraste, el prototipo número 4 (E) mostró fallos por delaminación, atribuidos al desempeño subóptimo del epóxico. El valor pico de carga registrado para los prototipos alcanzó los 46.3 MPa, siendo notablemente representativo para el dispositivo categorizado como U.

En un estudio reciente de Riadh et al. (2023), se llevaron a cabo evaluaciones de prototipos a escala reducida de aisladores sísmicos de neopreno, específicamente aisladores sísmicos reforzados con fibra de carbono (C-FREIs) y núcleos de poliuretano (C-FRPE). El refuerzo implementado consistió en una fibra de carbono bidireccional de 0.25 mm de espesor. Se introdujeron variaciones en el diseño del dispositivo mediante la incorporación de huecos en tres configuraciones distintas: un hueco central (C-FRPE1), cinco huecos de 25 mm de diámetro (C-FRPE2) y una combinación de cinco huecos, cuatro de 20 mm y uno central de 38.5 mm (C-FRPE3) tal como se aprecia en la Ilustración 5. Es importante mencionar que la adhesión entre la fibra de carbono y el caucho se aseguró mediante un proceso de vulcanización en frío, utilizando un adhesivo específico entre las capas y sometiénolas a presión durante dos días. Estos huecos fueron posteriormente rellenos con núcleos de poliuretano, material caracterizado por una dureza de 60 ± 3 shore A y una resistencia a la tracción de 37 MPa. Al someter los prototipos a cargas monótonas con una frecuencia de 0.2 Hz y presiones que variaron entre 2 y 9.5 MPa, se observó que los mismos cedieron a presiones de 8.1 MPa, 7.7 MPa y 7.2 MPa para los modelos C-FRPE1, 2 y 3, respectivamente. Según los hallazgos de Riyadh et al. (2023a), estos aisladores muestran un rendimiento mecánico eficaz, considerando que la presión de compresión recomendada es inferior a 7 MPa. Sin embargo, al contrastar los C-FREIs con los C-FRPEs, estos últimos mostraron una reducción en su rigidez del 28-38% debido a los núcleos de poliuretano, aunque se observó un aumento del 33% en su capacidad de amortiguamiento.

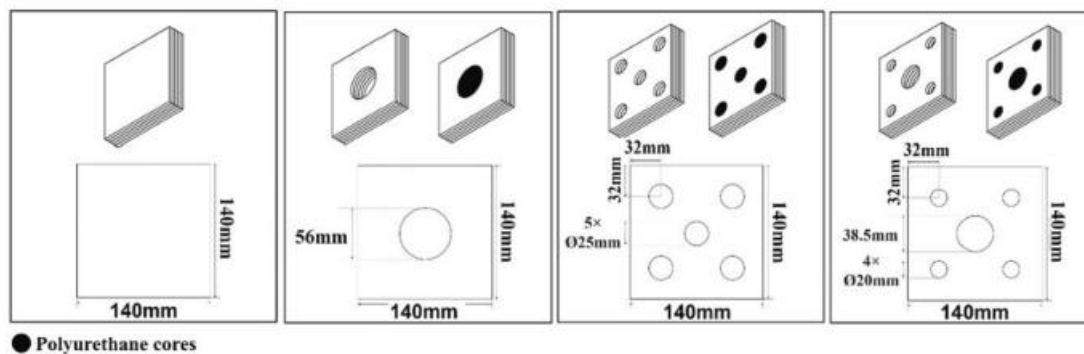


Ilustración 5. Núcleos de poliuretano en aislador sísmico. Fuente: Riyadh et al. (2023)

Wang et al. (2023), se investigó el rendimiento de aisladores sísmicos fortalecidos con placas de plástico. Estas placas, compuestas por la combinación de una resina epoxi viniléster fenólica y fibra de vidrio, son el resultado de la modificación de la resina epoxi fenólica mediante la adición de ácido metacrílico (ver Ilustración 6). Las láminas de refuerzo presentaban un espesor de 5 mm,

con propiedades mecánicas destacables como un módulo de elasticidad de 17800 MPa y una resistencia máxima a la tracción de 321 MPa. A través de pruebas, en las que se aplicaron cargas verticales variando entre 5 y 10 MPa, se determinó que los aisladores poseían una rigidez vertical de 394.3 kN/mm. A pesar de ello, su capacidad máxima vertical se estableció en 36 MPa, lo que indica una notable estabilidad y confiabilidad en situaciones de operación estándar. Adicionalmente, durante pruebas de cortante a una carga de 5 MPa y con frecuencias oscilando entre 0.01 Hz y 0.05 Hz, los aisladores alcanzaron deformaciones de hasta el 300%, manifestando una capacidad de amortiguamiento del 10.4%. Este nivel de amortiguamiento, que supera el 10%, está en consonancia con lo esperado para los SREIs.

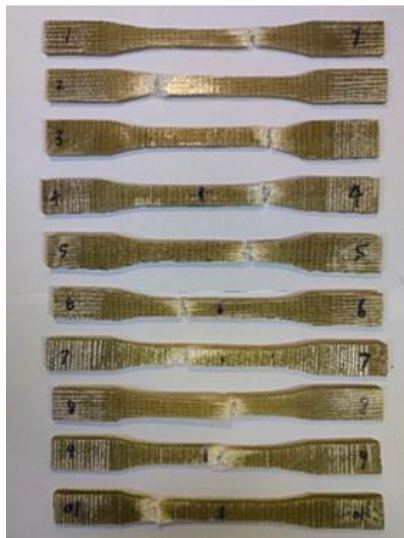


Ilustración 6. Láminas de plástico. Fuente: Wang et al. (2023)

Ortega et al. (2023) llevaron a cabo una evaluación mecánica de prototipos de aisladores sísmicos confeccionados a partir de caucho reciclado y reforzados con fibra de poliéster bidireccional, una innovación propuesta inicialmente por Madera (2018) para caucho natural. Este material de refuerzo, el poliéster, presentaba un espesor de 1.1 mm y un módulo de elasticidad de 1175 MPa. A través de ensayos de compresión, tanto monotónicos como cíclicos, se sometieron a los prototipos a una carga en tres ciclos a una velocidad de 0.01 mm/s, alcanzando los 25 kN, un valor que excede en un 30% la carga diseñada. Los datos revelaron un incremento de desplazamiento vertical de 5 mm y una disminución del 0.4% en deformaciones residuales en comparación con los diseños de Madera (2018). Durante el ensayo cíclico, se notó que, debido al reacomodo de partículas del caucho reciclado sometido a compresión, hubo una discrepancia del

46% entre los valores experimentales de rigidez (11.8 kN/mm) y los teóricos (20 kN/mm). Adicionalmente, en ensayos de corte, los prototipos alcanzaron desplazamientos de hasta 16 mm, lo que representa una deformación del 50%, indicando que el comportamiento de estos prototipos es inferior al de aisladores fabricados con caucho natural.

En resumen, en la Tabla 1, se detallan los elementos empleados por diversos investigadores, especificando la matriz, el refuerzo y el adhesivo. Estos materiales se clasifican de la siguiente manera: caucho natural (NR), caucho reciclado (RR), acero (S), fibra de carbono (C), fibra de poliéster (PL), fibra de kevlar (KR), fibra de vidrio (GL), fibra de nylon (NL), plástico de ingeniería (EP), fibras naturales (NF), prototipo rectangular (Rec) y prototipo circular (Cir). A partir del análisis de esta tabla, en este estudio se propone explorar, desde una perspectiva mecánica, refuerzos que no han sido objeto de evaluación en investigaciones previas. Entre ellos, se incluyen geotextiles y mallas biaxiales, que se distinguen por su elevada resistencia tensil, su resistencia a la abrasión y su durabilidad ante las condiciones climáticas, compuestas por fibras de Multifilamento G5 de poliéster de alta tenacidad PET, tratadas con un copolímero de alto rendimiento. Adicionalmente, es relevante destacar que las fibras naturales y los plásticos de ingeniería, cuando se incorporan en matrices de caucho reciclado, aún no han sido evaluados, identificando así una oportunidad investigativa en el contexto colombiano. Además, es pertinente mencionar que la adherencia interlaminar no ha sido analizada mecánicamente de manera independiente del dispositivo. Esta interacción será objeto de estudio en el presente trabajo, mediante la utilización de prototipos circulares de aisladores sísmicos.

Tabla 1. Revisión de literatura

Autor	Matriz		Refuerzo					Evaluación mecánica de Adhesivo	Forma de					
	NR	RR	S	C	PL	KR	GL		NL	EP	NF	Rec	Cir	
(B. Y. Moon et al., 2002)	X				X								Tratamiento de RFL	X
(Kang et al., 2003)	X		X	X			X						Tratamiento de RFL	X
(Mordini & Strauss, 2008)	X			X			X							X
(Russo et al., 2013)	X			X										X
(Mokhtari Motameni et al., 2013)	X			X									Chemosil 222	X
(Angeli et al., 2013)	X			X										X
(Tan et al., 2014)	X								X					X
(Osgooei et al., 2014)	X			X										X
(Strauss et al., 2014)	X		X	X										X
(Spizzuoco et al., 2014)		X	X										Adhesivo de poliuretano	X
(Karimzadeh Naghshineh et al., 2014)	X		X	X										X
(Van Engelen et al., 2014)	X			X										X
(Calabrese et al., 2015)		X	X										Adhesivo de poliuretano	X
(Pauletta et al., 2015)	X			X									Vulcanización	X
(Al-Anany & Tait, 2015)	X			X										X
(Osgooei et al., 2015)	X			X										X
(Osgooei et al., 2016)	X			X										X
(Abedi Koupai et al., 2017)	X		X											X
(Castillo Ruano & Strauss, 2018)	X		X	X			X							X
(Thuyet et al., 2018)	X			X										X
(Madera Sierra et al., 2019)	X		X	X					X					X
(Calabrese, Losanno, et al., 2019)		X	X				X						Adhesivo de poliuretano	X
(Losanno et al., 2020)	X			X	X								Adhesivo de poliuretano	X
(Cilento et al., 2021)		X	X		X				X					
Proceedings Conference		X	X		X				X					
(Losanno et al., 2022)	X			X	X								Adhesivo químico	X
(Ortega et al., 2023)		X		X										X
(M. Wang & Zhang, 2023)		X												X
Este documento		X			X				X	X			Adhesivos estructurales, adhesivos en frío y epoxi	X

5.3. Marco Teórico

5.3.1. Sobre aislamiento sísmico

Cuando se diseña una estructura, la actividad sísmica es un aspecto muy importante que se tiene en cuenta, esto se ve reflejado en las dimensiones de elementos estructurales tal como columnas, vigas y cimentación. Estos diseños se encargan de disipar la energía causada por un terremoto, con el fin de evitar el colapso de las edificaciones y con ello la pérdida de vidas. Ahora bien, la energía introducida por cargas dinámicas ya sean de sismo o viento (IE), tiene que ser igual a la suma de la energía cinética absoluta (EK), la energía de deformación elástica (ES), es la energía histerética (EH), más la energía disipada por amortiguamiento inherente de la estructura (ED) como se indica en la ecuación 1 por Genatios y Lafuente (2016):

$$E_K + E_S + E_D + E_H = E_I \quad (1)$$

Normalmente se prevé que se formarán "rótulas plásticas" en las vigas primero que, en las columnas, y usualmente en zonas de las vigas cercanas a los nodos. De esta manera, con un buen diseño sísmico, se busca controlar los mecanismos de falla de la estructura y evitar el colapso prematuro que pudiera sobrevenir por la ocurrencia de fallas frágiles y repentinas. Cuando se introduce un sistema de aislamiento sísmico, la ecuación 1 se ve modificada presentando la condición mostrada en la ecuación 2

$$E_I = E_K + (E_{DI} + E_{DA}) + E_S + E_H \quad (2)$$

Donde es la energía disipada por el amortiguamiento inherente de la estructura y es la energía disipada por un mecanismo adicional donde $E_{DI}E_{DA}$ al aumentar EDA se logra reducir la respuesta elástica e histerética (energía disipada por efectos de deformación inelástica de los materiales) del sistema, permitiendo el balance energético y con ello mitigar el riesgo por sismos (FEMA-BSSC, 2015).

Teniendo en cuenta que los disipadores de base proporcionan un amortiguamiento a la estructura, esto se ve reflejado en la disminución de la aceleración y con ello las cargas en la base que llega a la estructura. Estas cargas son proporcionada por espectros obtenidos a través de registros sísmicos como se aprecia en la Ilustración 7 (Basar et al., 2021). Al proveer menor carga sísmica, las dimensiones de elementos estructurales se ven disminuidas y con ello el costo de construcción (Konstantinidis y Kelly, 2014).

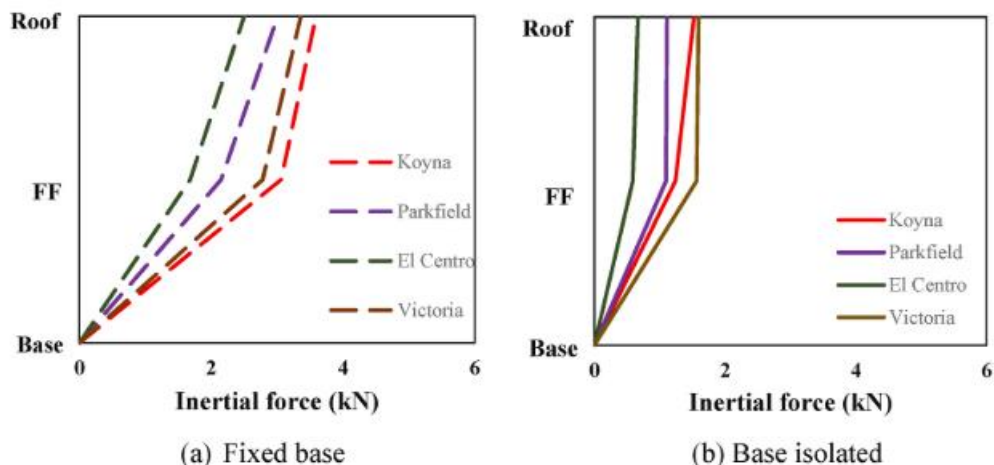


Ilustración 7. Reducción de fuerzas en la base por aislador sísmico. Fuente: Basar et al. (2021)

El Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10, en el capítulo A.3.8 permite el uso de estructuras aisladas sísmicamente en su base, siempre y cuando se cumplan en su totalidad los requisitos al respecto de uno de los dos documentos siguientes: (AIS, 2010)

- a) "NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings — Provisions and Commentary", edición de 2003, Agencia Federal para el Manejo de Emergencias, FEMA 450, Building Seismic Safety Council, National Institute of Buildings Sciences, Washington, D.C., EE.UU., 2004.
- b) "Cargas mínimas de diseño para edificios y otras estructuras", ASCE/SEI 7 05, Instituto de Ingeniería Estructural de la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles, Reston, Virginia, EE.UU., 2006.

Ahora bien, para el diseño de los aisladores, autores como Ingrid E. Madera Sierra, (2018), Pauletta (2019) y Dolce et al. (s.f.) han seguido procedimientos como se muestra en la Ilustración

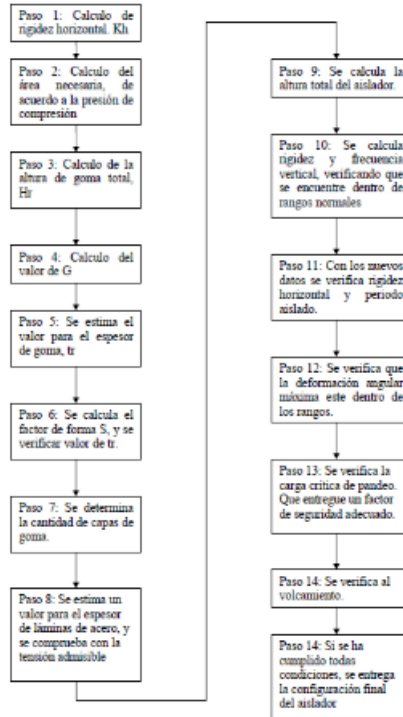


Ilustración 8. Diagrama de flujo para el diseño de un aislador HDR. Fuente: Ferrer Gallegos (2016)

En los dispositivos se debe evaluar propiedades mecánicas como la rigidez vertical y la horizontal cuando se aplican fuerzas en dos direcciones, el módulo de corte y el amortiguamiento (Dolce et al., s.f.; B. Y. Moon et al., 2002).

Kelly y Konstantinidis (2011) proponen un cálculo de la rigidez vertical teniendo en cuenta las propiedades de un refuerzo flexible como lo mostrado en la ecuación 3:

$$K_v = \frac{E_f^c A}{Hr} \quad (3)$$

Donde:

E_f^c = Modulo de compresion matriz – refuerzo

A = Area transversal del aislador

Hr = Espesor total del elastomero

E_f^c depende de parámetros como se muestra en α y β en la Ilustración 9, donde está en función del módulo de elasticidad ($E\alpha_f$), el espesor (t_f), el coeficiente de Poisson del refuerzo (ν), el espesor de la capa de caucho (t_r) y el radio del di; envo (R); en función del módulo de corte

(G), el radio del dispositivo (R), el factor de compresibilidad (K) y el espesor de la lámina de caucho ($t\beta_r$) como se muestra en las ecuaciones 4 y 5.

$$\alpha^2 = \frac{12(1-\nu^2)G_{20}R^2}{(E_f t_f t_r)} \quad (4)$$

$$\beta = \frac{12G_{20}R^2}{K t_r} \quad (5)$$

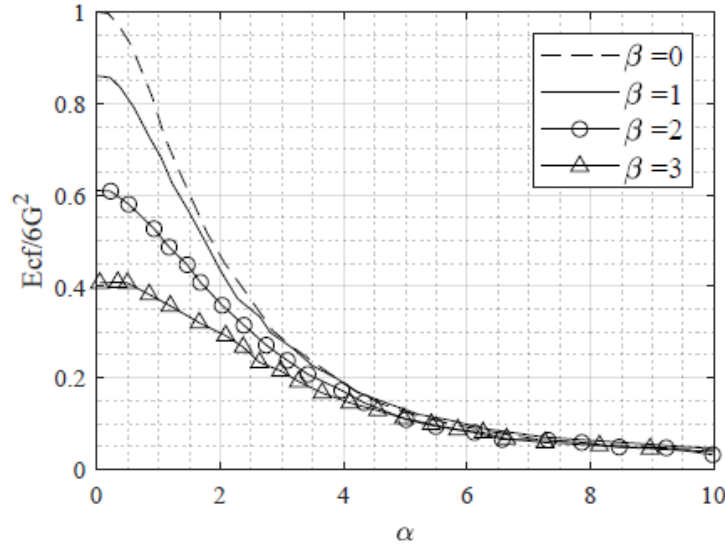


Ilustración 9. Gráfica para el cálculo del módulo de elasticidad normalizado (E_f^c). Fuente: Kelly y Konstantinidis (2011)

El módulo de corte (G) se calcula mediante la ecuación 6

$$G = \frac{\tau_{max} - \tau_{min}}{\gamma_{smax} - \gamma_{smin}} \quad (6)$$

Donde γ_{smax} y γ_{smin} son las deformaciones de corte máxima y mínima de los ciclos de histéresis; $\tau_{máx}$ y $\tau_{mín}$ son los esfuerzos de corte máximo y mínimo ($\tau = F/A$); F es la fuerza medida, y Un es el área de corte del espécimen (Madera, 2018).

Ahora bien, la razón de amortiguamiento es quien brinda la capacidad de disipación de energía (Spizzuoco et al., 2014), el cual depende la energía disipada en cada ciclo W_d , es la rigidez horizontal efectiva K_{eff} y el promedio de los máximos desplazamientos positivos y negativos, como lo mostrado en la ecuación 7 (FEMA-BSSC, 2015):

$$\beta = \frac{W_d}{2\pi K_{eff} \Delta^2_{max}} \quad (7)$$

Donde K_{eff} depende de F_{max} y F_{min} son las fuerzas en la máxima y mínima de deformación, u_{max} y u_{min} que son la máxima y mínima deformación como se muestra en la ecuación 8

$$K_{eff} = \frac{F_{max} - F_{min}}{u_{max} - u_{min}} \quad (8)$$

6. MATERIALES Y PROCEDIMIENTOS

6.1. Propiedades mecánicas y selección del refuerzo

El refuerzo proporciona el comportamiento vertical necesario para la transmisión de carga dentro de los dispositivos de aislamiento sísmico. Este estudio propone la evaluación de ocho materiales para determinar sus propiedades mecánicas e identificar el refuerzo más adecuado para su uso en aisladores sísmicos. Es importante destacar que todos los materiales evaluados están fácilmente disponibles en el mercado, lo que garantiza la aplicabilidad práctica y la facilidad de adquisición para fines de implementación. Estos materiales, como se muestra en la Ilustración 10, incluyen poliéster de fibra de alto módulo (HRA), fibra de polipropileno (TR), poliéster de alta tenacidad con copolímero 750 (GM), refuerzo de malla de poliéster 300 (GO), malla de fibra de vidrio con resina de poliéster (FP), malla de fibra de vidrio con resina epoxi (FVE), fibra de fique natural (FB) y tela tejida de fibra de poliéster desarrollada por Losanno et al. (2019) con resina epoxi (PLE).

Dado que el módulo de elasticidad, el espesor y la relación de Poisson son las características reflejadas en la rigidez vertical del aislador, estas se determinaron mediante mediciones y ensayos mecánicos en muestras de los refuerzos como se mencionó anteriormente.

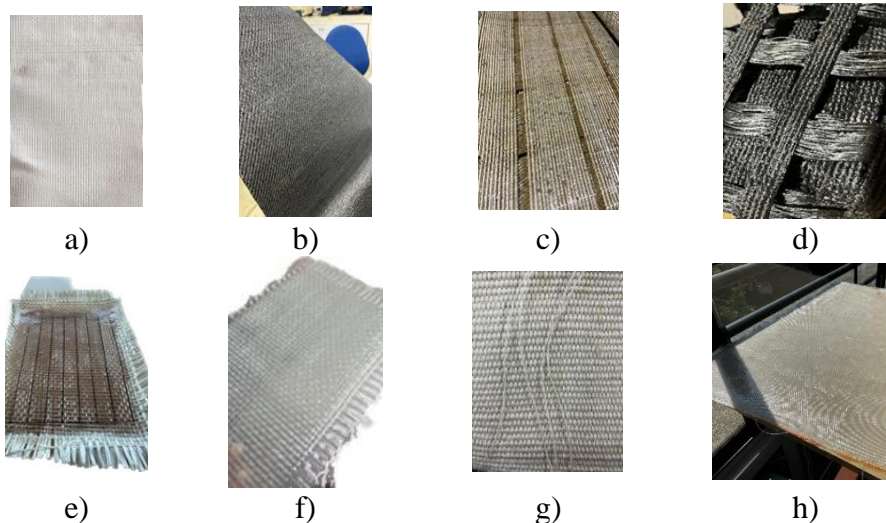


Ilustración 10. Refuerzos: a) HRA, b) TR, c) GM, d) GO, e) FP, f) FVE, g) FB y h) PLE

Los ensayos de tracción se realizaron en el Laboratorio de Materiales de la Pontificia Universidad Javeriana Cali (PUJC), siguiendo las normas ISO 527-4 (Norma Española, 2022). Se

prepararon cinco especímenes de cada material, midiendo 25 mm de ancho por 250 mm de largo. El espesor de cada espécimen se midió en tres puntos: el extremo derecho, el extremo izquierdo y el centro, utilizando un calibrador digital con una precisión de $\pm 0,01$ mm. Se calculó el promedio, y este espesor se utilizó para procesos posteriores (consultar la Tabla 2).

Posteriormente, las probetas fueron sujetadas individualmente en una máquina INSTRON con una capacidad de carga máxima de 10 kN, ubicada en la PUJC. A lo largo de la prueba, se registraron datos de carga y deformación para calcular el módulo de elasticidad y la resistencia máxima a la tracción.

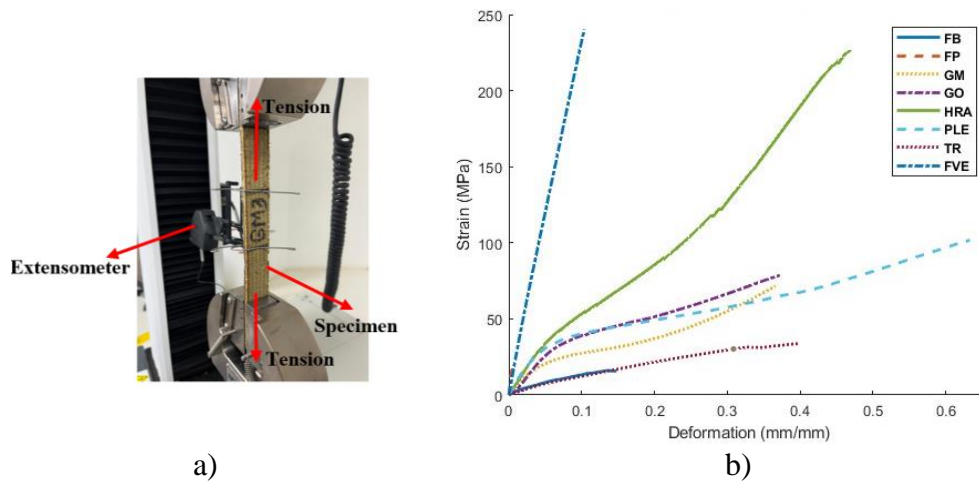


Ilustración 11. a) Ensayo de tracción y b) Gráficos de tensión-deformación de refuerzos

Los datos de tensión y deformación se registraron durante las pruebas de tracción para cada fibra. La deformación se controló mediante un extensómetro de hasta $0,00001$ mm/mm en una longitud de 50 mm, como se muestra en la Ilustración 11 (a). Las normas estipulan que el módulo de elasticidad del material debe determinarse utilizando la pendiente entre el rango de deformación de $0,0005$ y $0,0025$ para cada tipo de fibra probada (HRA, TR, GM, GO, VE, FP, FVE, FVE y PLE). Los resultados obtenidos se representan en Ilustración 11 (b), que muestra el gráfico de los resultados medios de cada armadura ensayada.

Cabe destacar que los gráficos mostrados variaron entre el 6% y el 16% con respecto a la media. Cuando la diferencia porcentual fue más pronunciada, se atribuyó al comportamiento inherente del material. Por ejemplo, la fibra de fique fabricada manualmente debe tener estándares de calidad establecidos, lo que lleva a una falta de uniformidad en el tejido. Esta ausencia de regulaciones contribuyó significativamente a las disparidades observadas en los resultados.

Tabla 2. Resultados de la caracterización mecánica de refuerzos

	Espesor (mm)	Módulo elástico (MPa)	Fuerza (MPa)	Deformación (mm/mm)	Tf * E (N/mm)	Relación de Poisson	Costo (USD/m ²)
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

Al analizar el desempeño mecánico de los materiales evaluados, como se detalla en la Tabla 2, FVE demostró un módulo de elasticidad superior en comparación con los otros materiales, superando el promedio de los otros materiales en un 54%. Cuando se evaluó un espesor reducido, su módulo de elasticidad alcanzó los 2280 MPa, lo que representa una mejora del 94% en comparación con el refuerzo (PLE) utilizado por Losanno et al. (2019). Por el contrario, al examinar los otros materiales, se observó que, a pesar de tener altas resistencias a la tracción, mostraron valores significativamente bajos de módulo de elasticidad, acompañados de un bajo esfuerzo de tracción. Además, el análisis de la resistencia del FVE, registrada en Newtons por milímetros de material, revela un rendimiento que supera la media de los demás materiales en un 86%, estableciéndose, así como un material con un rendimiento superior bajo cargas de tracción. Esta es la razón por la que se eligió FVE como el material de refuerzo preferido debido a sus propiedades mecánicas superiores. Adicionalmente, su selección estuvo influenciada por la facilidad de adquisición y producción, así como por su rentabilidad, ya que el precio de la fibra desarrollada por Losanno et al. (2019) se redujo en un 35,19%. Estos factores posicionan colectivamente a FVE como una opción óptima para mejorar el rendimiento de los dispositivos de aislamiento sísmico.

6.2. Propiedades Mecánicas del Adhesivo para la interfaz Refuerzo - Caucho Reciclado

Los aisladores sísmicos actúan como amortiguadores para disminuir las fuerzas destructivas de los terremotos en las estructuras al desacoplar un edificio de los movimientos del suelo. Un componente de estos aisladores es el adhesivo dentro de la capa de interfaz. Este adhesivo no solo mantiene la integridad estructural del aislador, sino que también dicta marcadamente su

rendimiento sísmico. Con la evolución de la infraestructura y la construcción de edificios más altos, el escrutinio académico y técnico hacia estos adhesivos se ha intensificado. Sus propiedades reológicas, su durabilidad a largo plazo y su adaptabilidad a diversas condiciones de carga son de creciente interés, especialmente porque desempeñan un papel esencial en la eficacia del aislador para mitigar las fuerzas sísmicas (Cilento et al., 2021).

Para garantizar una unión óptima entre la matriz de caucho reciclado y el refuerzo en un aislador sísmico, es imperativo seleccionar el adhesivo adecuado, especialmente teniendo en cuenta las limitaciones inherentes al caucho reciclado. De hecho, mientras que el caucho natural se beneficia del proceso de vulcanización para mejorar su adherencia, el caucho reciclado no puede volver a someterse a vulcanización debido a su naturaleza particulada y a la activación previa de sus puentes de azufre. En consecuencia, se hace hincapié en la aplicación de resinas o adhesivos para establecer la conexión adhesiva necesaria. Las alternativas seleccionadas para este propósito incluyen adhesivo a base de acetato de metilo (S), adhesivo a base de 2-metilpentano (M), adhesivo a base de 2-cianoacrilato de etilo (CA), adhesivo de etileno acetato de vinilo (N), adhesivo a base de éster de cianoacrilato (L), adhesivo epoxi de 2 componentes (TP), adhesivo de prepolímero DMI (AA) y adhesivo de montaje híbrido (PF).

6.2.1. Ensayo de Adherencia por Cortante

Dado que el dispositivo está sometido a esfuerzos cortantes entre la matriz y la armadura, es fundamental evaluar su adherencia según las pautas marcadas en la norma EN 1465, denominado ensayo de cizallamiento de adherencia (ST) (EN1645, 2009). Para ello, se fabricarán cinco probetas de 100 mm x 25 mm, compuestas por caucho reciclado y el refuerzo seleccionado (FVE), tal y como se muestra en la Ilustración 12. Estas probetas se unirán utilizando adhesivos de más de 12,5 mm para identificar qué adhesivo proporciona la máxima adherencia contra los movimientos de cizallamiento. Posteriormente, las muestras se sometieron a un ensayo de tracción a velocidad constante, asegurando que la duración total del ensayo no supere los 60 segundos para determinar la eficacia adhesiva de cada compuesto.

6.2.2. Ensayo de Adherencia por Tracción

El procedimiento descrito en la norma ISO 36 (Iso y Une, 2016) se empleó el llamado ensayo de tracción por adherencia (TT), para evaluar la fuerza adhesiva. Tres probetas, cada una con un ancho de 25 mm y una longitud mínima de 100 mm, se fabricaron utilizando caucho reciclado y FVE, como se presenta en Ilustración12 (a) para cada adhesivo. La carga de tracción se aplicó utilizando una máquina Instron con una capacidad de 10 kN, a una velocidad constante de 50 mm/min. Este enfoque tiene como objetivo determinar la tensión adhesiva máxima para cada adhesivo, lo que permite identificar el que tiene la mayor capacidad. Este procedimiento de prueba estandarizado garantiza una evaluación integral del rendimiento y la adherencia del adhesivo de manera controlada y replicable.

6.2.3. Propiedades Mecánicas y Selección de Adhesivos

Para realizar los ensayos TT y ST fue necesario fabricar el refuerzo seleccionado, FVE. Simultáneamente, se llevó a cabo la producción de caucho reciclado, lo que implicó la creación de un molde específico que permitió la fabricación de probetas siguiendo las especificaciones descritas en la norma ISO 36 (Iso y Une, 2016) y EN 1645 (EN1645, 2009) estándares como se muestra en la Ilustración12. Este proceso asegura la precisión y la conformidad de las probetas obtenidas con las normas de ensayo establecidas, facilitando una evaluación rigurosa y estandarizada de los materiales.

Las pruebas de adherencia (TT y ST) se realizaron en la PUJC. Cada probeta se colocó en una máquina Instron con una capacidad de 10 kN para aplicar una deformación constante, siguiendo las normas ISO 36 (Iso y Une, 2016) y EN 1645 (EN1645, 2009). Se registraron datos de fuerza para calcular la capacidad adhesiva de cada adhesivo, como se muestra en la Tabla 2. Además, para clasificar el tipo de fallo, se emplearon acrónimos específicos: RT indica los casos en los que se produjo una separación entre el elastómero y el refuerzo debido a la ausencia de adherencia; R denota los casos en los que la ruptura se originó dentro de la capa de elastómero; y RA se refiere a las separaciones entre la capa de elastómero y el adhesivo como se muestra en la Ilustración13.

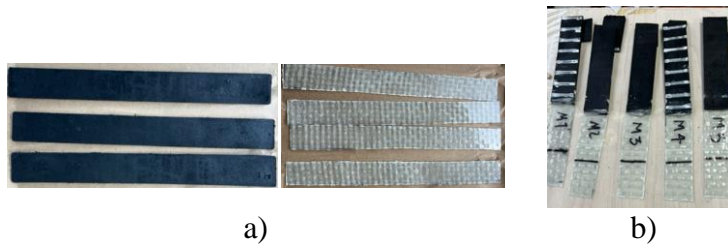


Ilustración 12. Probetas: a) Ensayo de tracción por adherencia y b) Probetas para ensayo de adherencia por corte

Los adhesivos S, M y N demostraron una fuerza adhesiva de 0,119 N/mm, que es menor resistencia en comparación con otros adhesivos evaluados, experimentando fallas entre las dos superficies analizadas (tipos de falla RT y RA en la Ilustración 13). Por otro lado, los adhesivos CA, L, T y AA mostraron un excelente desempeño, fallando la matriz ante la adhesión entre superficies (falla tipo R en Ilustración 13). Sin embargo, al evaluar estos adhesivos se tuvo en cuenta un factor económico y su presentación. Dada la necesidad de producción de dispositivos a gran escala, los adhesivos L y T no tienen una presentación adecuada para la fabricación extensiva, a diferencia de los adhesivos CA y AA.

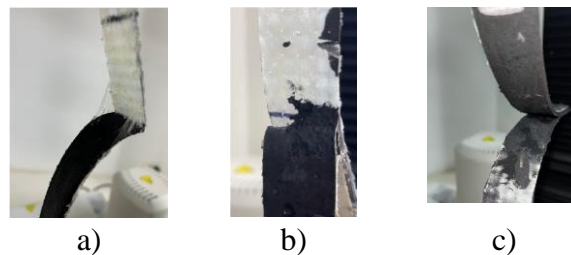


Ilustración 13. Tipos de fallo: a) RT, b) R y c) RA

Por otro lado, para probar el adhesivo PF, se aplicó la cantidad necesaria en frío entre las superficies laminadas de caucho reciclado y refuerzo FVE. Sin embargo, como se presenta en la Tabla 3, su rendimiento fue un 54% inferior al de los adhesivos de mayor rendimiento (CA, L, TP y AA). A continuación, se llevó a cabo un proceso de unión colocando una base de matriz sin curar y el refuerzo con el adhesivo, creando una especie de sándwich, que luego se presionó y calentó durante 20 minutos a 140° C. Al intentar separar las superficies, no fue posible, ya que el adhesivo unió perfectamente las dos partes entre sí como se presenta en la Ilustración 14. Por lo tanto, el adhesivo pasó de funcionar en condiciones frías a funcionar mejor cuando se aplicó calor en la fabricación de un prototipo, lo que permitió que las partículas de caucho se alinearan mejor dentro del adhesivo. Es importante tener en cuenta que el adhesivo AA demostró una mejora a través del

mismo proceso, como se muestra en la Ilustración14. Esta ilustración destaca la compatibilidad entre la matriz y el adhesivo, donde la unión entre las superficies era excepcionalmente fuerte.



Ilustración14. Adherencia monolítica bajo presión térmica.

Tabla 3 Resultados de adhesión según las normas ISO36 y EN1945

Adhesivo	Presentación	Costo (USD)	Resistencia media a la adhesión ISO36 (N/mm)	Resistencia media a la adhesión al cizallamiento EN1945 (N/mm ²)	Tipo de error	Temperatura
S	500 g	\$ 55.98	0.119	0.142	RT	No es necesario
M	467 g	\$ 38.75	0.053	0.143	RT	No es necesario
CA	28,3 g	\$ 15.00	2.188	1.332	R	No es necesario
N	539 g	\$ 45.00	0.089	0.147	RT	No es necesario
L	5 g	\$ 3.25	1.794	1.710	R	No es necesario
TP	16 g	\$ 3.75	0.634	1.318	RA	No es necesario
AA	1 L	\$ 50.00	1.768	2.527	R	20 min 140°C
PF	460 g	\$ 17.50	0.541	0.790	R	20 min 140°C

Teniendo en cuenta las propiedades mecánicas y el costo de adquisición, se seleccionaron tres adhesivos (CA, AA y PF) para verificar su comportamiento en un prototipo de aislador sísmico. Estos adhesivos exhibieron un costo de adquisición significativo en relación con su forma y el rendimiento que ofrecen, con resistencias de adhesión promedio que oscilaron entre 1.768 y 2.188 N/mm. Además, hubo facilidad para obtener materiales del mercado nacional.

6.3. Fabricación del Prototipo de Aislador Sísmico

El siguiente paso consistió en someterse a una prueba de aplicabilidad mediante la selección de los adhesivos óptimos (CA, AA y PF) y el refuerzo en función de la evaluación realizada (FVE). En esta fase se evaluó su rendimiento en prototipos a escala reducida de aisladores sísmicos, tal y como lo presentaron Losanno et al. (2019), con el objetivo de confirmar la eficacia de los adhesivos y refuerzos tanto individualmente como en su comportamiento integrado dentro de un contexto representativo de las condiciones estructurales reales.

6.3.1. Proceso de Fabricación Monolítico

El procedimiento descrito por Ortega et al. (2023), Madera Sierra et al., (2020) y Madera Sierra et al. (2019) se siguió para la fabricación de prototipos de caucho reciclado, utilizando la matriz de caucho reciclado con una dosificación y densidad de $0,99 \text{ g/cm}^3$. El material provino de Occidental de Cauchos SAS. Los prototipos fabricados siguieron las recomendaciones de Losanno et al. (2019), cumpliendo con los requisitos de FEMA 450, considerando una estructura de acero con cuatro apoyos con dos grados de libertad y una masa reducida a $1/6$ dando un valor de carga axial de 19 kN por columna en el edificio. Para el período de diseño, se eligieron 1,15 segundos, utilizando siete registros sísmicos con un período de retorno de 1900 años. Además, el desplazamiento máximo de la estructura se calculó a 30 mm para una deformación del 100% con un amortiguamiento objetivo del 10%. En consecuencia, se desarrollaron prototipos con un diámetro de 80 mm y una altura de 44 mm, incorporando el refuerzo y adhesivo seleccionados, como se muestra en la Ilustración 15.

La fabricación de prototipos de aisladores sísmicos monolíticos se llevó a cabo a través de un proceso detallado y preciso. Se diseñó específicamente un molde de acero para alojar la mezcla de caucho preparada previamente, lo que permitió el entrelazado estratégico de las capas de refuerzo y la aplicación de los tres adhesivos seleccionados: Cianoacrilato (CA), Adhesivo Acrílico (AA) y Fenol Formaldehído (PF). Cada adhesivo se probó en diferentes prototipos, como se detalla en la tabla 4. Este procedimiento dio como resultado una estructura compuesta por 15 capas de caucho y 14 capas de refuerzo, formando un conjunto que representa con precisión la configuración planificada para los aisladores sísmicos.

Estas capas se consolidaron a través de un proceso de prensado, donde el conjunto moldeado se sometió a una presión específica durante 40 minutos. Este proceso crítico se llevó a cabo a una temperatura controlada de 140 °C para inducir una adhesión adecuada entre las partículas de caucho reciclado. La temperatura y la duración del prensado se optimizaron para permitir que el aglomerado de caucho reciclado se fusionara adecuadamente, asegurando la cohesión estructural del prototipo, como se muestra en Ilustración15 (a, b y e).

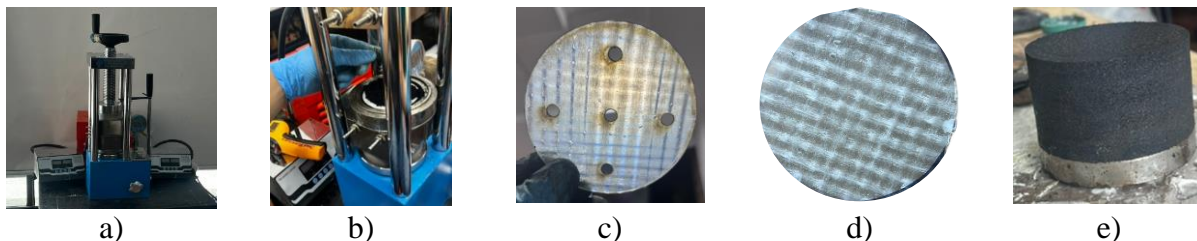


Ilustración15. Proceso de fabricación: a) prensa térmica, b) fundición en molde de caucho, c) refuerzo con agujeros, d) refuerzo sin agujeros, y e) producto final

Siguiendo el procedimiento descrito, se llevó a cabo la fabricación y nomenclatura de los prototipos, considerando diversas combinaciones de refuerzos, adhesivos y mezclas de caucho. Para esta evaluación se seleccionaron los refuerzos: el desarrollado por Madera Sierra et al. (2019) (PL) y el conjunto del presente proyecto, a base de malla de fibra de vidrio con resina epoxi (FVE).

Además, se consideraron láminas de refuerzo con cinco orificios, cada uno de 5 mm de diámetro, y sin agujeros, como se muestra en la Ilustración15 (c y d). Este enfoque tenía como objetivo determinar si la presencia de agujeros mejoraría la adherencia entre las capas de caucho y el refuerzo y evaluar su impacto en la rigidez vertical y horizontal.

La nomenclatura adoptada para los prototipos se adhiere al formato Adhesivo/Mezcla y Refuerzo/Número, ofreciendo un método claro y sistemático para identificar cada combinación evaluada en este estudio, como se ilustra en la Tabla 4. Este enfoque facilita la creación de dos prototipos para cada combinación, lo que garantiza una evaluación exhaustiva de su rendimiento.

Para las mezclas de caucho reciclado se tuvieron en cuenta tres formulaciones: una desarrollada por Ortega et al. (2023), Madera-Sierra et al. (2021) y dos de Meza-Muñoz et al. (2024). Distinguir entre las mezclas formuladas por Meza-Muñoz et al. (2024), se asignaron etiquetas PAFVE10 y PAFVE15, indicando la diferencia entre las dos mezclas de caucho. Para la mezcla desarrollada por Ortega et al. (2023), solo se conservó el nombre del refuerzo para identificarla.

6.3.2. Proceso de Fabricación por Capas

Por otro lado, el proceso de fabricación de aisladores sísmicos se ejecutó en capas, utilizando un procedimiento detallado basado en la unión en frío. Este método fue elegido para reducir la cantidad de energía consumida en el proceso de creación monolítico. La utilización de calor es necesaria para activar el adhesivo en el enfoque monolítico, asegurando la adhesión de todas las capas del prototipo como una unidad cohesiva. Por el contrario, el proceso de estratificación mediante unión en frío tuvo como objetivo lograr niveles similares de adhesión sin los extensos requisitos de energía, presentando así una alternativa energéticamente eficiente en la fabricación de aisladores sísmicos. Se utilizó el adhesivo 2-cianoacrilato de etilo (CA), ya que los otros dos adhesivos seleccionados no proporcionan una adhesión adecuada en frío. Cada capa del dispositivo se formó individualmente, alternando láminas de refuerzo y láminas de caucho reciclado unidas con el adhesivo mencionado, como se muestra en la Ilustración 16.

La fabricación por capas implicó la creación de cada uno en un molde con un diámetro de 80 mm y un espesor de 2 mm. Posteriormente, la composición resultante se sometió a una temperatura de 140°C durante 8 minutos. Esta temperatura específica permitió que el aglutinante promoviera la adhesión entre las partículas de caucho reciclado. Una vez que se prepara cada lámina de caucho reciclado, el refuerzo y la lámina de caucho se unen entre sí mediante el adhesivo en frío CA, lo que da como resultado prototipos mostrados en la Ilustración 16 (c).

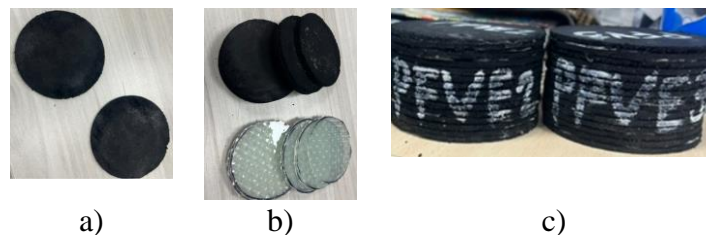


Ilustración 16. Proceso de fabricación del prototipo por capas: a) capa de caucho reciclado, b) capa de caucho reciclado y refuerzo FVE sin agujeros, y c) prototipo final por capas.

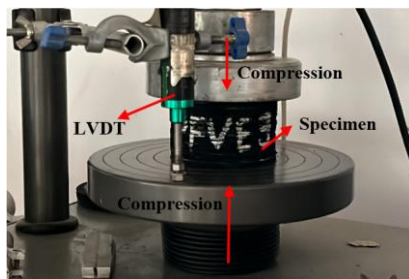
Este método de construcción, centrado en la unión en frío, implicaba un proceso de fabricación que requería más tiempo; sin embargo, asegura una adecuada cohesión estructural del prototipo. El resultado es un dispositivo estratificado que refleja la configuración conceptual y, a través de esta técnica, permite una evaluación práctica del desempeño del aislador sísmico en condiciones

cercanas a la realidad. La producción de los prototipos mostrados se llevó a cabo únicamente con el refuerzo FVE y la mezcla desarrollada por Ortega et al. (2023).

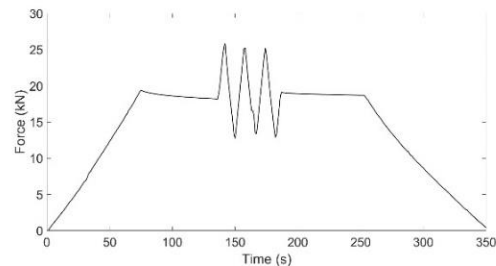
6.4. Propiedades Mecánicas de Prototipos de Aisladores Sísmicos

6.4.1. Evaluación del Desempeño en la Dirección Vertical

Con el fin de evaluar el comportamiento mecánico bajo compresión y determinar la rigidez vertical de los prototipos, se realizó una prueba de compresión cíclica en el PUJC utilizando una máquina suministrada por Geotest Instrument Corp, con una capacidad de compresión de 5 toneladas Ilustración17 (a).



a)



b)

Ilustración17. a) Montaje ensayo de compresión ciclica y b) Protocolo de compresión cíclica

Esta prueba consistió en tres etapas para medir los desplazamientos generados bajo una carga de compresión variable. Inicialmente, los prototipos soportaron una carga de compresión aplicada a una velocidad de 0,01 mm/s hasta alcanzar la carga de diseño de 19 kN, según lo informado por Madera Sierra et al. (2019). Posteriormente, se utilizaron tres ciclos consecutivos hasta alcanzar el $\pm 30\%$ de la carga de diseño a una velocidad de 0,05 mm/s. Finalmente, se eliminó la carga de compresión a una velocidad de 0,01 mm/s como se muestra en la Ilustración17 (b).

Los gráficos obtenidos en el ensayo cíclico determinaron los valores máximos y mínimos de cada ciclo, donde la pendiente resultante revela la rigidez vertical experimental. Es importante señalar que el análisis consideró el promedio de los dos prototipos probados para cada combinación de adhesivo, caucho reciclado y refuerzo. Las combinaciones de los prototipos probados se presentan en la Tabla 4.

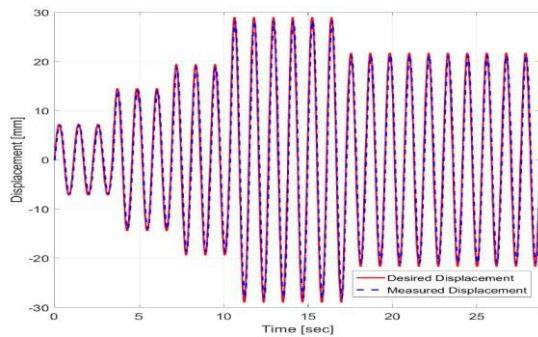
Tabla 4. Prototipos desarrollados para ensayos cíclicos de compresión y cortante.

Matriz	Refuerzo	Adhesivo	Orificios	Proceso de fabricación	Etiqueta
Ortega et al. (2023)	Poliéster	Poliuretano	No	Monolítico	REF1, REF2
Ortega et al. (2023)	FVE	CA	No	Monolítico	CA-PFVESH1, CA-PFVESH2
Ortega et al. (2023)	FVE	CA	Sí	Monolítico	CA-PFVE1, CA-PFVE2
Ortega et al. (2023)	FVE	CA	No	Capas	Capas CA-PFVE1, Capas CA-PFVE
Ortega et al. (2023)	FVE	PF	Sí	Monolítico	PF-PFVEH1, PF-PFVEH2
Meza-Muñoz et al. (2024) PA10	FVE	AA	Sí	Monolítico	AA-PAVF10-1, AA-PAVF10-2
Meza-Muñoz et al. (2024) PA15	FVE	AA	Sí	Monolítico	AA-PAVF15-1, AA-PAVF15-2
Meza-Muñoz et al. (2024) PA10	FVE	PF	Sí	Monolítico	PF-PAVF10-1, PF-PAVF10-2
Meza-Muñoz et al. (2024) PA15	FVE	PF	Sí	Monolítico	PF-PAVF15-1, PF-PAVF15-2

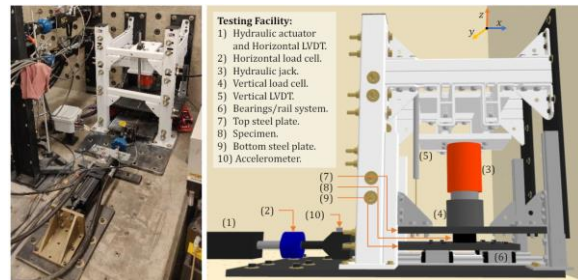
6.4.2. Evaluación del Desempeño en la Dirección Horizontal

Para determinar la respuesta horizontal de los prototipos, se realizó una prueba de cizallamiento cíclico en el Laboratorio de Sistemas de Infraestructura Inteligente (IISL) de la Universidad de Purdue. En una configuración a pequeña escala, un actuador vertical con una capacidad de 294 kN mantenía una fuerza vertical constante de 22 kN, que representaba el peso de la superestructura. La carga vertical se midió utilizando un transductor de célula de carga con una capacidad nominal de 88,9 kN, colocado entre la placa superior y el gato hidráulico. El desplazamiento vertical de la placa superior se midió mediante un transductor LVDT (Linear Variable Differential Transformer) con una carrera de $\pm 76,2$ mm. Se utilizó un actuador servohidráulico lineal de doble extremo (Shore Western, serie 910D), con una fuerza nominal máxima de 9,78 kN y una carrera de ± 60 mm, para aplicar el desplazamiento horizontal a la probeta. Un transductor LVDT, integrado en el actuador, medía el desplazamiento de la varilla del actuador (Patiño Reyes, 2022). Se aplicó el protocolo de desplazamiento, apegándose a las

recomendaciones de la Losanno et al. (2020) involucrando siete terremotos en la dirección Norte-Sur y siete en la dirección Este-Oeste, seleccionados por las normas ASCE7-16, con un período de retorno de 100 años. El protocolo se ejecutó en seis niveles de deformación: 25%, 50%, 67%, 100%, 100% y 75% de la deformación máxima, que se registró a 29 mm, como se muestra en Ilustración18 (a).



a)



b)

Ilustración18. a) Protocolo de cortante cíclica y b) Ensayo de cortante cíclica de ensamblaje (Patiño Reyes, 2022)

Los prototipos desarrollados se probaron individualmente dentro del bastidor de carga, como se ve en la Ilustración18 (b), donde se recopilaron datos sobre la fuerza y el desplazamiento. Este proceso facilitó la determinación de la rigidez horizontal y el amortiguamiento proporcionados por el dispositivo, así como su máxima deformación, para evaluar la capacidad de los prototipos para soportar y mitigar las fuerzas sísmicas, asegurando su eficacia como dispositivos de aislamiento sísmico.

7. RESULTADOS Y DISCUSION

7.1. Compresión Cíclica

Sobre la base de los resultados presentados en la tabla 5, se observó que la malla de fibra de vidrio con resina epoxi exhibió el comportamiento esperado. En comparación con el refuerzo utilizado por Ortega et al. (2023), hubo una mejora del 288,98% en la rigidez vertical, con un aumento de un valor de 17,69 kN/mm a un promedio de 45,90 kN/mm en todos los prototipos probados. Además, la comparación entre la rigidez vertical teórica y experimental reveló un porcentaje máximo de variación del 12,5%, valor inferior al 33,5% reportado por Ortega y cols.. (Ortega et al., 2023). Esta discrepancia se atribuyó a movimientos inusuales de la máquina de prueba, lo que provocó que el prototipo se moviera durante la prueba. Además, variaciones como el 18,2% fueron mayores, pero representaron valores experimentales que superaron las cifras teóricas esperadas.

Aunque la armadura se perforó con cinco agujeros de 5 mm de diámetro, estas modificaciones no afectaron a la rigidez vertical. La variación observada se debió a la reorganización de las partículas de caucho y al módulo de cizallamiento de las diferentes mezclas utilizadas en los prototipos. La armadura seleccionada presentó un porcentaje máximo de deformación residual de 0,68% y un mínimo de 0,23%, valores inferiores a los obtenidos por Losanno et al. (2019) y Ortega et al. (2023), lo que representa una mejora del 18% y del 24% respectivamente. Cabe destacar que los prototipos no mostraron ningún daño hasta un aumento del 30% en la carga de diseño aplicada (19 kN).

Además, los prototipos fabricados en capas (CA-PFVE Layers) también mostraron una mejora en la rigidez vertical en comparación con los prototipos monolíticos desarrollados por Ortega et al. (2023), con un incremento del 121,48%. Esta mejora les permite soportar una mayor carga con menores deformaciones residuales, como se presenta en la Tabla 5. Se logró una notable mejora en la deformación residual del 36,21%, lo que permitió que las estructuras que emplean estos dispositivos tengan una probabilidad reducida de experimentar asentamientos diferenciales en los apoyos.

Tabla 5. Resultados ensayo de compresión cíclica.

Espécimen	Kvexp promedio (kN/mm)	Kvth (kN/mm)	Diferencia (%)	Hola (mm)	Hf (mm)	ϵ_{res} (%)
REF	17.69	20	11.6%	43.99	43.73	0.58%
CA-PFVESH	43.53	43	1.9%	43.66	43.50	0.37%
CA-PFVE	37.35	43	12.5%	44.38	44.08	0.68%
Capas CA- PFVE	39.18	43	8.3%	47.92	47.75	0.37%
PF-PFVEH	50.49	43	18.2%	44.48	44.33	0.33%
AA-PAVF10	57.29	49	16.5%	44.99	44.82	0.38%
AA-PAVF15	50.44	53	5.0%	45.69	45.59	0.23%
PF-PAVF10	43.78	49	10.9%	45.44	45.28	0.35%
PF-PAVF15	45.11	53	15.1%	46.27	46.01	0.57%

7.2. Cortante Cíclica

Cuando se realizó la prueba de cizallamiento, la mayoría de los prototipos exhibieron una condición de deslizamiento en las superficies. Esto se debía a la baja abrasividad del caucho reciclado, lo que provocaba que la parte inferior de los prototipos se desgastara, destruyendo la primera capa de caucho, como se muestra en Ilustración19 (a).

Adicionalmente, al crear prototipos monolíticos con el adhesivo CA, etiquetado como CA-PFVE, que no requiere un proceso de curado por calor, se observó una falla por falta de adherencia (AF) en la base en estos especímenes (Tabla 6). Durante los ciclos de cizallamiento, las capas se desprendieron, como se ve en Ilustración19 (b), y el espécimen no cumplió con el protocolo establecido, cuando se inició la porción del 25% del protocolo de deformación, como se muestra en la Tabla 6. Este desprendimiento se produjo porque, al entrar en contacto con el calor en el proceso monolítico de fabricación, el adhesivo perdía sus propiedades mecánicas.

Los prototipos designados como AA-PAV15 y CA-PFVESH también mostraron un bajo rendimiento, logrando solo una deformación del 25% con un desplazamiento de solo 6,9 mm. Esto ocurría porque, durante la ejecución del ensayo a deformaciones superiores al 25%, el dispositivo fallaba por fricción, como se muestra en la Ilustración19 (a) (FF), evitando una mayor deformación del dispositivo y, por lo tanto, no permitiendo la disipación de energía.

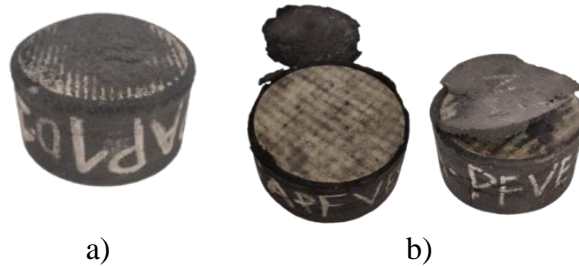


Ilustración 19. a) Falla por fricción en la base (FF) y b) Falla por adherencia (AF)

Teniendo en cuenta que la mezcla de caucho reciclado utilizada en los prototipos PF-FVEH era la misma que en los prototipos CA-PFVESH, estos prototipos, aunque solo lograron una deformación del 50%, demostraron, como se ve en la Tabla 6, que, al cambiar el adhesivo de un CA a un PF, que es un adhesivo flexible, hubo una mejora en la amortiguación del 29,46% en comparación con el CA-PFVESH y una mejora en el desplazamiento del 106,35%. Además, en comparación con el prototipo desarrollado por Ortega et al. (2023), denominado en esta investigación como REF, se observó una disminución de la rigidez horizontal del 2,5% y una mejora del desplazamiento del 2,3%.

La mejora que trajo consigo el adhesivo flexible PF también se demostró con la mezcla al 15% desarrollada por Meza-Muñoz et al. (2024); los prototipos PF-PAVF15, en comparación con el AA-PAFV15, mostraron una mejora en la deformación horizontal del 5,07% a una deformación inferior al 50% en el que los prototipos AA-PAFV15 fallaron por fricción (FF), así como una disminución de la rigidez horizontal del 33,52%.

Por otro lado, los prototipos realizados en capas, denominados CA-PFVE Layers, mostraron un mejor comportamiento que el prototipo presentado por Ortega et al. (2023) y Madera Sierra et al. (2020). Como se ilustra en la Tabla 6, los prototipos lograron un desplazamiento de 18,73 mm con una deformación del 67%, lo que representa una mejora del 33,98% y un aumento de la amortiguación del 64,42%. Esto marca una progresión desde un 17,02% de amortiguación con una deformación del 50% hasta lograr una deformación mayor del 67% con una tasa de amortiguación del 20,75%, en comparación con el prototipo desarrollado por Ortega et al. (2023), y la fibra desarrollada por Losanno et al. (2019), tal como se presenta en Tabla 6 (REF). En cuanto a la rigidez horizontal, se observó una reducción significativa, pasando de una deformación de solo el 50% con un valor de 365,03 N/mm a una deformación mayor del 67% con un valor de 252,89 N/mm. Esto representa una reducción de la rigidez horizontal del 52,93%, tal y como se observa

en Tabla 6. Además, estos prototipos demostraron la condición de roll-over a una deformación del 67%, condición presentada en los prototipos de Losanno et al. (2019), como se muestra en Ilustración20 (a). Este comportamiento no se produjo en los prototipos por Ortega et al. (2023), (Madera Sierra et al., 2020).

Del mismo modo, los prototipos denominados PF-PAFV15 mostraron un mejor rendimiento que las capas CA-PFVE y los desarrollados por Ortega et al. (2023). En cuanto al desplazamiento, completaron todo el protocolo de ensayos, consiguiendo un desplazamiento de 29 mm al 100% de deformación, lo que supone una mejora del 93,3% respecto a otras investigaciones (Ortega et al., 2023), (Madera Sierra et al., 2020), como se muestra en la Tabla 6. Además, con una deformación del 100%, la rigidez horizontal se redujo en un 67%, proporcionando una amortiguación del 23%, lo que supone una mejora del 109% en comparación con Ortega et al. (2023) y Madera Sierra et al. (2020), como se observa en la Tabla 6 respectivamente. Además, se buscó una condición de roll-over para este tipo de dispositivo en estado desconectado (Castillo Ruano y Strauss, 2018), donde también se logró como se presenta en Ilustración20 (b). Con respecto a Losanno et al. (2020), aunque los prototipos PF-PAFV15 exhibieron mayor rigidez horizontal debido a las propiedades del caucho reciclado, se logró que al mismo porcentaje de deformación (100%), la amortiguación proporcionada por el dispositivo de caucho reciclado fue del 23%, una mejora del 53,33% respecto a la reportada para el caucho natural con fibra de poliéster (15%).



a)



b)

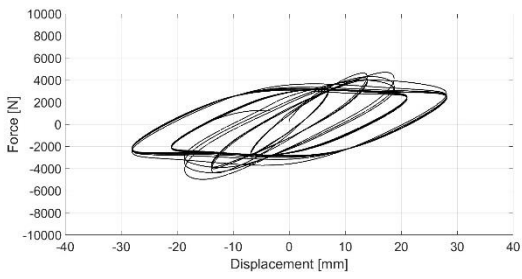
Ilustración20. Condición de roll-over en a) CAPAS CA-PFVE y b) PF-PAFVE15

El rendimiento proporcionado por los prototipos PF-PAFV15 demostró que, mediante el uso de un adhesivo flexible, la mezcla de caucho reciclado desarrollada por Meza-Muñoz et al. (2024) al 15%, una mezcla con mejores propiedades que la desarrollada por Ortega et al. (2023), y el refuerzo de malla de fibra de vidrio con resina epoxi (FVE), se logró lograr una deformación del 100% del dispositivo.

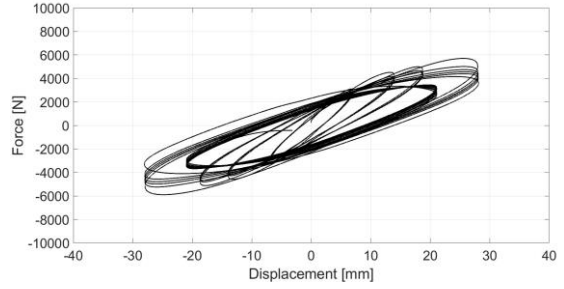
Los prototipos CA-PFVE Layers y PF-PAFV15 mostraron un rendimiento óptimo, alineándose con los principios de diseño para estructuras de baja altura (Madera Sierra et al., 2019). Esto permitió que los aisladores diseñados (PF-PAFV15) en este estudio proporcionaran un amortiguamiento del 23%, un valor que es un 130% superior al objetivo (10%) (Ilustración 21, 22 y 23). En consecuencia, esto permite el uso del dispositivo, ya que ofrece las propiedades mecánicas necesarias para su aplicación. Del mismo modo, los prototipos diseñados en capas (CA-PFVE Layers) pero utilizando un adhesivo que no requería activación por calor (CA), demostraron la capacidad de proporcionar una amortiguación del 20,75% a una deformación del 65%, demostrando también ser un dispositivo prometedor para edificios de baja altura.

Tabla 6. Resultados de la prueba de cortante cíclica

Espécimen	Kh (N/mm) para diferentes deformaciones					Amortiguamiento (%) para diferentes deformaciones					desplazamiento máximo (mm)
	25%	50%	67%	100%	75%	25%	50%	67%	100%	75%	
REF	537.29	365.03	SS	--	--	12.62	17.02	SS	--	--	13.98
CA-PFVESH	528.61	SS	--	--	--	11.20	SS	--	--	--	6.93
CA-PFVE	AF	--	--	--	--	AF	--	--	--	--	AF
CA-PFVE LAYERS	449.73	317.04	252.89	SS	--	13.93	15.81	20.75	SS	--	18.73
PF-FVEH	524.03	371.09	SS	--	--	12.04	14.50	SS	--	--	14.30
AA-PAVF15	646.02	SS	--	--	--	13.46	SS	--	--	--	6.94
PF-PAVF10	344.45	255.21	212.09	SS	--	12.31	13.20	15.02	SS	--	18.88
PF-PAVF15	429.38	308.68	258.19	188.59	166.26	12.12	13.50	14.46	22.70	22.64	28.40

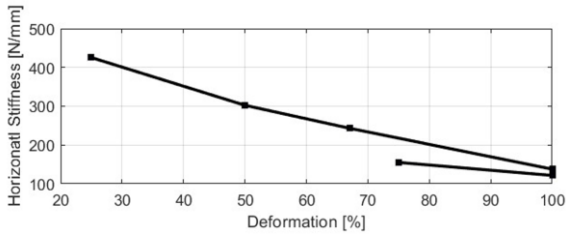


a)

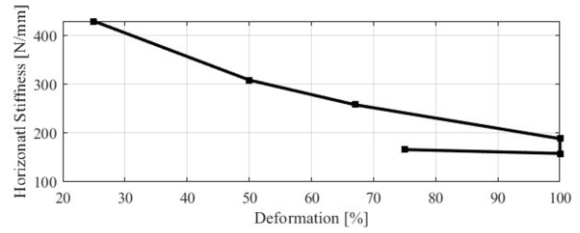


b)

Ilustración 21. Histeresis a) CA-PFVE Layers y b) PF_PFVE15

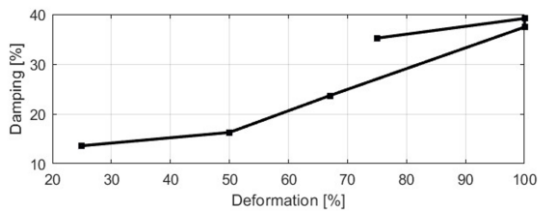


a)

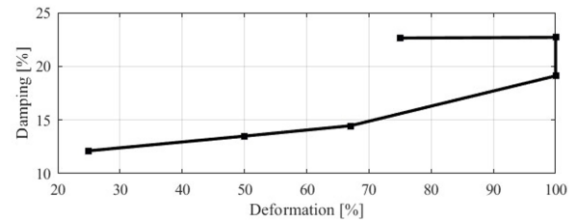


b)

Ilustración 22. Rigidez horizontal para diferentes porcentajes de deformación a) CA-PFVE Layers y b) PF_PFVE15



a)



b)

Ilustración 23. Amortiguamiento para diferentes porcentajes de deformación a) CA-PFVE Layers y b) PF_PFVE15

8. CONCLUSIONES

En este trabajo se presentan los resultados obtenidos cuando se mejoran las propiedades mecánicas de los aisladores sísmicos con una matriz de caucho reciclado mediante la modificación de refuerzo y adhesivo. Mediante la realización de ensayos mecánicos de tracción y adhesión, fue posible identificar los materiales óptimos para el refuerzo y el adhesivo en prototipos de aisladores sísmicos de caucho reciclado. El objetivo era producir dispositivos que fueran más rentables y ligeros, especialmente para estructuras de poca altura en los países en desarrollo. Los resultados demostraron que mediante el uso de una malla de fibra de vidrio con resina epoxi se logró un módulo de elasticidad de 2280 MPa. Este resultado se debió a la combinación de los dos elementos produciendo una lámina muy delgada de 1,35 mm, que, en comparación con otros materiales de refuerzo, exhibió un rendimiento superior en términos de costo, facilidad de adquisición y propiedades mecánicas obtenidas. En comparación con el refuerzo de otros investigadores, hubo una mejora del 94% en las propiedades mecánicas (Losanno et al., 2020; Ortega et al., 2023). Del mismo modo, los adhesivos seleccionados, uno en frío (CA) y otro que requiere calor para su activación (PF), lograron una adhesión óptima con las superficies del prototipo diseñado. Este rendimiento se debió a su alta compatibilidad para adherir material poroso, como el caucho reciclado, a las superficies de resina del refuerzo FVE.

Los resultados de este estudio indicaron una mejora significativa en la respuesta vertical de los dispositivos, siendo el refuerzo elegido el que mejoró esta respuesta en un 288,8%. Además, el propio proceso constructivo demostró la capacidad de conseguir mayores deformaciones. Empleando la misma mezcla que Ortega et al. (2023) pero cambiando el refuerzo, el adhesivo y optando por una construcción en capas en lugar de monolítica, la deformación se incrementó del 50% al 67%. Del mismo modo, la amortiguación máxima se mejoró del 17,02% al 20,75% y permitió la condición de vuelco, lo que subraya la eficacia de las innovaciones materiales y metodológicas.

Además, el estudio demostró que el tipo de adhesivo utilizado para unir las superficies de caucho reciclado influye significativamente en la respuesta horizontal de los dispositivos. Al utilizar un adhesivo flexible (PF), se observó una mejora en las propiedades mecánicas de los dispositivos. Esto condujo a mayores porcentajes de deformación y amortiguamiento, junto con una disminución de la rigidez horizontal, lo que facilitó el vuelco en el prototipo PF-PAVF15 y la

disipación efectiva de energía a través de este mecanismo con un porcentaje de amortiguamiento del 23 %. El prototipo en capas, de manera similar, reforzado y utilizando un adhesivo de proceso en frío, también se mostró prometedor, subrayando su potencial para aplicaciones de aislamiento sísmico similares al PF-PAVF15, dispositivo hecho de caucho reciclado con un 15% de aglutinante, desarrollado por Meza-Munoz et al. (2024), y reforzado con malla de fibra de vidrio y resina epoxi (FVE), unido con un adhesivo flexible (PF). Se ha demostrado que este enfoque mejoró significativamente las propiedades mecánicas, similar a la eficacia de la configuración en capas. Los hallazgos colectivos ilustran la profunda influencia de la selección de adhesivos, la integración de refuerzos y el uso estratégico de la construcción en capas en el avance del campo de los dispositivos de aislamiento sísmico.

9. PERSPECTIVAS

Se espera que este trabajo de investigación sea un paso crucial en la implementación de dispositivos de aislamiento sísmico en países en vías de desarrollo en edificaciones de baja altura, con un costo de adquisición más bajo y una implementación más sencilla. Se subraya la importancia de prevenir colapsos y pérdidas tanto materiales como humanas durante los eventos sísmicos que ocurren en todo el mundo. A continuación, se presentan algunas perspectivas de investigación derivadas de este trabajo:

- Para estimar el comportamiento de los dispositivos a gran escala, se propone crear dispositivos a escala real para someterlos a ensayos mecánicos de cortante cíclico y compresión cíclica, con el fin de comprender su comportamiento en condiciones reales, así como también modelos en elementos finitos que permitan predecir su comportamiento tanto vertical como horizontal en aras de disminuir las actividades experimentales ante variaciones que puedan ser realizadas en los dispositivos.
- Con el objetivo de verificar la funcionalidad de los dispositivos desarrollados en esta investigación, se plantea el diseño de una estructura utilizando software estructural. En este diseño se aplicarán las características obtenidas de la investigación para evaluar el comportamiento de un edificio de baja altura con la aplicación de los dispositivos de aislamiento sísmico de caucho reciclado.
- Para ampliar el rango de aplicabilidad de los aisladores desarrollados, se propone estudiar el impacto económico y funcional de los mismos en diversas estructuras, como puentes, edificios administrativos y residenciales, representativos de la infraestructura colombiana. Esto incluye la elaboración de un plan estratégico para la comercialización y posicionamiento de los dispositivos de caucho reciclado en el mercado de la construcción en Colombia.

10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Basar, T., Deb, S. K., Das, P. J., & Sarmah, M. (2021). Seismic response control of low-rise unreinforced masonry building test model using low-cost and sustainable un-bonded scrap tyre isolator (U-STI). *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 142(December 2020), 106561. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2020.106561>
- Calabrese, A., Spizzuoco, M., Galano, S., Tran, N., Strano, S., & Terzo, M. (2021). A parametric study on the stability of fiber reinforced rubber bearings under combined axial and shear loads. *Engineering Structures*, 227(October 2020), 111441. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111441>
- Calabrese, A., Spizzuoco, M., Serino, G., Della Corte, G., & Maddaloni, G. (2015). Shaking table investigation of a novel, low-cost, base isolation technology using recycled rubber. *Structural Control and Health Monitoring*, 22(1), 107–122. <https://doi.org/10.1002/stc.1663>
- Calabrese, A., Spizzuoco, M., Strano, S., & Terzo, M. (2019). Hysteresis models for response history analyses of recycled rubber–fiber reinforced bearings (RR-FRBs) base isolated buildings. *Engineering Structures*, 178(March 2018), 635–644. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.10.057>
- Cardona Urrutia, P. del P. (2016). ESTUDIO DE FACTIBILIDAD PARA LA CREACIÓN DE UNA PLANTA DE PRODUCCIÓN DE GRANOS DE CAUCHO (GCR) MEDIANTE EL RECICLAJE DE LLANTAS FUERA DE USO [Universidad Tecnologica de Pereira]. In *Universidad Tecnologica de Pereira*. <https://hdl.handle.net/11059/6123>
- Castillo Ruano, P., & Strauss, A. (2018). An experimental study on unbonded circular fiber reinforced elastomeric bearings. *Engineering Structures*, 177(April), 72–84. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.09.062>
- Chilon Zarate, E. A. (2019). *Diseño y analisis sismico comparativo entre un sistema con aisladores de nucleo de plomo y un sistema con disipadores de fluido viscoso en una edificacion de 4 niveles* [Universidad Catolica Santo Toribio de Mogrovejo]. <http://hdl.handle.net/20.500.12423/1968>
- Cilento, F., Losanno, D., & Piga, L. (2021). Laboratory characterization of a reclaimed rubber compound for low-cost elastomeric isolators. *COMPdyn Proceedings, 2021-June*, 2525–

2535. <https://doi.org/10.7712/120121.8655.18969>

ClimateScience. (2022). *Acero sostenible*. 2022. <https://climatescience.org/es/advanced-steel-climate>

Colombia Legal Corporation. (2021). Principales problemas al importar y exportar en Colombia. In *Colombia Legal Corporation*. <https://www.colombialelegalcorp.com/blog/principales-problemas-al-importar-y-exportar-en-colombia/>

Den Einde, L. Van, Zhao, L., & Frieder, S. (2003). Use of FRP Composites in civil Structural Applications. *Construction and Building Materials*, 17(8), 595–602. [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(03\)00053-9](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(03)00053-9)

Dolce, M., Cardone, D., & Palermo, G. (n.d.). *Design Procedures and Seismic Performances of Isolation Systems for Bridges*.

EN1645. (2009). *Determinación de la resistencia a la cizalla por tracción de montajes pegados solapados*. Norma Española EN1645.

FEMA-BSSC. (2015). NEHRP Recommended seismic provisions for new buildings and other structures. *Building Seismic Safety Council, I*, 515.

Garcia-Garcia, J., López, D. C., & Montes-Urbe, E. (2018). Las barreras y las medidas no arancelarias en Colombia - Nota explicativa. *Borradores de Economía; No. 1036*. <http://repositorio.banrep.gov.co/handle/20.500.12134/6993>

Genatios, C., & Lafuente, M. (2016). Introducción Al Uso De Aisladores Y Disipadores En Estructuras. In *Banco de Desarrollo de America Latina*. <file:///C:/Users/Lenovo/Downloads/Usodeaisladoresydisipadoresenestructuras.pdf%0Aascioteca.caf.com>

Habieb, A. B., Valente, M., & Milani, G. (2019). Base seismic isolation of a historical masonry church using fiber reinforced elastomeric isolators. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 120(December 2018), 127–145. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2019.01.022>

Hollaway, L. C., & Head, P. R. (2001). Advanced Polymer Composites and Polymers in the Civil Infrastructure. In *Advanced Polymer Composites and Polymers in the Civil Infrastructure* (pp. 1–4).

- Iso, N. I., & Une, N. (2016). *Elastómeros, vulcanizados o termoplásticos - Determinación de la adhesión a tejidos textiles*.
- Karimzadeh Naghshineh, A., Akyüz, U., & Caner, A. (2014). Comparison of fundamental properties of new types of fiber-mesh-reinforced seismic isolators with conventional isolators. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 43(2), 301–316. <https://doi.org/10.1002/eqe.2345>
- Kelly, J. M. (1986). Aseismic base isolation: review and bibliography. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 5(4), 202–216. [https://doi.org/10.1016/0267-7261\(86\)90006-0](https://doi.org/10.1016/0267-7261(86)90006-0)
- Kelly, J. M. (1999). Analysis of Fiber-Reinforced elastomeric Isolators. In *Revue* (Vol. 2, Issue 1, pp. 19–33).
- Kelly, J. M. (2002). Seismic Isolation Systems for Developing Countries. *Earthquake Spectra*, 18(3), 385–406. <https://doi.org/10.1193/1.1503339>
- Kelly, J. M., & Konstantinidis, D. A. (2011). Mechanics of Rubber Bearings for Seismic and Vibration Isolation. In *Mechanics of Rubber Bearings for Seismic and Vibration Isolation*. <https://doi.org/10.1002/9781119971870>
- Kelly, J. M., & Takhirov, S. M. (2001). Analytical and Experimental Study of Fiber-Reinforced Elastomeric Isolators. *Rep. No. PEER 2001/11, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, September*.
- Konstantinidis, D., & Kelly, J. M. (2014). Advances in low-cost seismic isolation with rubber. *NCEE 2014 - 10th U.S. National Conference on Earthquake Engineering: Frontiers of Earthquake Engineering*. <https://doi.org/10.4231/D36M33449>
- Losanno, D., Madera Sierra, I. E., Spizzuoco, M., Marulanda, J., & Thomson, P. (2019). Experimental assessment and analytical modeling of novel fiber-reinforced isolators in unbounded configuration. *Composite Structures*, 212(December 2018), 66–82. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.01.026>
- Losanno, D., Madera Sierra, I. E., Spizzuoco, M., Marulanda, J., & Thomson, P. (2020). Experimental performance of unbonded polyester and carbon fiber reinforced elastomeric isolators under bidirectional seismic excitation. *Engineering Structures*, 209(December 2019), 110003. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.110003>

- Losanno, D., Ravichandran, N., Parisi, F., Calabrese, A., & Serino, G. (2021). Seismic performance of a Low-Cost base isolation system for unreinforced brick Masonry buildings in developing countries. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 141(September 2020), 106501. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2020.106501>
- Madera-Sierra, I. E., Ortiz, A. R., & Rojas Cabrera, C. (2021). *ECO-AISLADORES: Aisladores Sísmicos Eco-amigables de Bajo Costo para la Mitigación de Riesgo en Infraestructura*. https://www.pef.hacienda.gob.mx/work/models/PEF2021/docs/53/r53_tv_v_pie.pdf
- Madera, I. E. (2018). DESARROLLO TECNOLÓGICO DE UN AISLADOR SÍSMICO DE BAJO COSTO PARA EDIFICACIONES BAJAS. In *Universidad del Valle*.
- Madera, I. E., Casas, J. M., & Thomson, P. (2019). Matrix and reinforcement materials for low-cost building isolators: An overview of results from experimental tests and numerical simulations. *Journal of Applied Research and Technology*, 17(1), 44–56. <https://doi.org/10.22201/icat.16656423.2019.17.1.756>
- Madera Sierra, I. E., Losanno, D., Strano, S., Marulanda, J., & Thomson, P. (2019). Development and experimental behavior of HDR seismic isolators for low-rise residential buildings. *Engineering Structures*, 183(January), 894–906. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.01.037>
- Madera Sierra, I. E., Marulanda Casas, J., Thomson Roach, P., Losanno, D., Gómez, M. Á., & Ortega Escobar, L. F. (2020). ECO-AISLADORES: Aisladores Sísmicos Eco-amigables para la Mitigación de Riesgo en Infraestructura. In *Pontificia Universidad Javeriana Cali*.
- Makris, N. (2019). Seismic isolation: Early history. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 48(2), 269–283. <https://doi.org/10.1002/eqe.3124>
- Meza-Muñoz, A. O., Rivas-Ordoñez, F. S., Madera-Sierra, I. E., & Rojas-Manzano, M. A. (2024). Development of a Matrix for Seismic Isolators Using Recycled Rubber from Vehicle Tires. *Construction and Building Materials*, 15.
- Mokhtari Motameni, M., Kokabi, M., & Bahramian, A. R. (2013). The effect of shear strain amplitude and loading cycle on the horizontal characteristics of fiber reinforced nanocomposite elastomeric seismic isolators. *International Polymer Processing*, 28(2), 168–173. <https://doi.org/10.3139/217.2637>

- Moon, B., Kang, G., Kang, B., & Kelly, J. M. (2002). *Diseño y fabricación de fibra reforzada aislador elastomérico para aislamiento sísmico*. 131, 145–150.
- Moon, B. Y., Kang, G. J., Kang, B. S., & Kelly, J. M. (2002). Design and manufacturing of fiber reinforced elastomeric isolator for seismic isolation. *Journal of Materials Processing Technology*, 130–131, 145–150. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)00713-6](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00713-6)
- Naeim, F., & Kelly, J. M. (1999). From Theory to Practice. In *John Wiley & Sons, Inc.* https://doi.org/10.1007/978-3-030-92454-6_7
- Norma Española. (2022). UNE-EN ISO 527-4:2021. Plásticos - Determinación de las propiedades en tracción - Parte 4: Condiciones de ensayo para plásticos compuestos isotrópicos y ortotrópicos reforzados con fibras. *Aenor*, 00(91).
- Ortega, L. F. (2022). *PROTOTIPOS DE AISLADORES SÍSMICOS CON MATRIZ DE CAUCHO RECICLADO PARA LA MITIGACIÓN DE RIESGO EN ESTRUCTURAS*.
- Ortega, L. F., Herazo, M. Z., Ortiz, A. R., Thomson, P., & Marulanda, J. (2023). Performance of prototype seismic isolators reinforced with fiber and a recycled rubber tire matrix. *Engineering Structures*, 278(October 2022), 115422. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.115422>
- Palacios Hernández, M. F. (2015). *Mecánica de aisladores elastoméricos de caucho incompresibles y su aplicación en el diseño de aisladores HDR*.
- Patino Reyes, E. D. (2022). *Development and Implementation of a Testing Facility for Real-Time Hybrid Simulation With a Nonlinear Specimen* (Issue December) [Purdue University]. <https://doi.org/10.25394/PGS.21642113.v1>
- Pauletta, M. (2019). Method to design fiber-reinforced elastomeric isolators (U-FREIs) and application. *Engineering Structures*, 197(February), 109366. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109366>
- Riyadh, M. M., Osman, S. S., & Alam, M. S. (2023a). Experimental investigation of novel carbon-fiber reinforced elastomeric isolators with polyurethane cores under vertical and lateral loading. *Engineering Structures*, 275(PA), 115186. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.115186>

- Riyadh, M. M., Osman, S. S., & Alam, M. S. (2023b). Experimental investigation of novel carbon-fiber reinforced elastomeric isolators with polyurethane cores under vertical and lateral loading. *Engineering Structures*, 275(PA), 115186. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.115186>
- Russo, G., Pauletta, M., & Cortesia, A. (2013). A study on experimental shear behavior of fiber-reinforced elastomeric isolators with various fiber layouts, elastomers and aging conditions. *Engineering Structures*, 52, 422–433. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2013.02.034>
- Sistla, S., & Mohan, S. C. (2021). Parametric studies and application of fibre reinforced elastomeric isolators to low-rise buildings. *Structures*, 34(September), 2679–2693. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.09.020>
- Skinner, R. I., Robinson, W. H., & McVerry, G. H. (1993). An introduction to seismic isolation. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 12(7), 449. [https://doi.org/10.1016/0267-7261\(93\)90010-o](https://doi.org/10.1016/0267-7261(93)90010-o)
- Spizzuoco, M., Calabrese, A., & Serino, G. (2014). Innovative low-cost recycled rubber-fiber reinforced isolator: Experimental tests and Finite Element Analyses. *Engineering Structures*, 76, 99–111. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.07.001>
- Strauss, A., Apostolidi, E., Zimmermann, T., Gerhaher, U., & Dritsos, S. (2014). Experimental investigations of fiber and steel reinforced elastomeric bearings: Shear modulus and damping coefficient. *Engineering Structures*, 75, 402–413. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.06.008>
- Takewaki, I. (2009). Building Control with Passive Dampers. In *Building Control with Passive Dampers*. <https://doi.org/10.1002/9780470824931>
- Tan, P., Liu, H., & Donà, M. (2021). Unconventional elastomeric isolators reinforced with engineered plastic plates: compressive failure analysis. *International Journal of Solids and Structures*, 230–231, 111163. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2021.111163>
- Tan, P., Xu, K., Wang, B., Chang, C. M., Liu, H., & Zhou, F. L. (2014). Development and performance evaluation of an innovative low-cost seismic isolator. *Science China Technological Sciences*, 57(10), 2050–2061. <https://doi.org/10.1007/s11431-014-5662-6>
- Terán A. (2010). El futuro del diseño sismorresistente de las edificaciones de concreto reforzado:

una visión basada en la sustentabilidad. *Concreto y Cemento: Investigación y Desarrollo*, 2(1), 2–16.

UCGS. (2023). *Worldwide Earthquakes*. Worldwide Earthquakes. <https://www.usgs.gov/programs/earthquake-hazards/lists-maps-and-statistics>

Wang, H., Mu, H., Guo, X., Zhang, Y., Ji, H., Luo, C., Feng, H., & Liu, D. (2023). Experimental and numerical simulation study on mechanical properties of fiber-reinforced plastic seismic isolator. *Engineering Structures*, 275(PA), 115108. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.115108>

Park, J., Park, K., & Yun, C. (2017). Evaluación del rendimiento estructural de aisladores elastoméricos reforzados con fibra de carbono mediante experimentos a gran escala y análisis de elementos finitos. *Materiales y Estructuras Inteligentes*, 26(5), 055012. DOI: 10.1088/1361-665X/aa667b

Gülkan, P., Kavas, A., & Korkmaz, S., & Yildırım, M. (2014). Aislamiento sísmico de edificios aislados de base utilizando aisladores elastoméricos reforzados con fibra (FREI). *Ingeniería Sísmica e Ingeniería de Vibraciones*, 13(1), 127-138. DOI: 10.1007/s11803-014-0