



Pontificia Universidad  
**JAVERIANA**  
Cali

**PROPIEDADES HIPERELÁSTICAS Y VISCOELÁSTICAS DEL MATERIAL DE  
CAUCHO RECICLADO UTILIZADO COMO MATRIZ DE AISLADORES SÍSMICOS: ESTUDIO  
EXPERIMENTAL Y FEM**

Programa de Maestría en Ingeniería Civil

Presentado por:

**Juan Sebastian Rodriguez Piedrahita**

Director: **Ingrid Elizabeth Madera Sierra**

Codirector: **Orlando Cundumí Sánchez**

Pontificia Universidad Javeriana Cali

Facultad de Ingeniería y Ciencias

Noviembre de 2024

## TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN.....	9
2.	DEFINICIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN .....	14
2.1.	Planteamiento del problema .....	14
3.	OBJETIVOS DEL PROYECTO.....	17
3.1.	Objetivo general .....	17
3.2.	Objetivos específicos.....	17
4.	JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO DE GRADO .....	18
5.	MARCO DE REFERENCIA.....	22
5.1.	Antecedentes .....	22
5.2.	Estado del arte .....	25
5.3.	Marco teórico .....	29
5.3.1.	Aisladores sísmicos.....	29
5.3.2.	Hiperelasticidad.....	30
5.3.2.1.	Ogden.....	30
5.3.2.2.	Mooney Rivlin .....	31
5.3.2.3.	Neo Hookean .....	31
5.3.2.4.	Arruda Boyce.....	32
5.3.2.5.	Bergstrom Boyce .....	32
5.3.3.	Viscoelasticidad.....	32
5.3.3.1.	Espectro de Prony.....	33
5.3.4.	Calibración inversa de materiales.....	34
5.3.4.1.	Algoritmos de calibración.....	34
6.	DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN .....	37

7.	OBTENCIÓN DE LOS PARAMETROS DEL CAUCHO RECICLADO.....	38
7.1.	Preparación del material .....	38
7.2.	Fase 1: Hiperelasticidad.....	39
7.2.1.	Ensayo de tensión uniaxial .....	39
7.2.1.1.	Desarrollo y resultados experimentales .....	40
7.2.2.	Ensayo de compresión uniaxial .....	42
7.2.2.1.	Desarrollo y resultados experimentales .....	43
7.2.3.	Ensayo de corte simple .....	45
7.2.3.1.	Desarrollo y resultados experimentales .....	45
7.2.4.	Calibración de las características hiperelásticas del caucho reciclado 47	
7.3.	Fase 2: Viscoelasticidad.....	48
7.3.1.	Ensayo de “Creep” .....	48
7.3.1.1.	Desarrollo y resultados experimentales .....	49
7.3.2.	Ensayo de relajación (Relaxation) .....	51
7.3.2.1.	Desarrollo y resultados experimentales .....	51
7.3.3.	Calibración de parámetros viscoelásticos.....	53
8.	CALIBRACIÓN Y RESULTADOS DE LOS PARAMETROS DE LA MATRIZ DE CAUCHO RECICLADO.....	54
9.	OBTENCIÓN Y VALIDACIÓN DE LOS PARÁMETROS DEL PROTOTIPO .....	59
9.1.	Modelos de elementos finitos (FEM).....	59
9.2.	Calibración .....	61
9.3.	Compresión cíclica (CC) .....	62
9.3.1.	Calibración y resultados de la Compresión cíclica (CC) .....	63

9.4.	Ensayo de corte cíclico (CS) .....	66
9.4.1.	Calibración y resultados del Corte Cíclico (CS).....	67
10.	CONCLUSIONES Y DISCUSIÓN.....	70
11.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	74
12.	GLOSARIO DE TERMINOS ESPECIALES.....	83
13.	AGRADECIMIENTOS.....	84

### **TABLA DE FIGURAS**

Figura 1.	Resumen gráfico del trabajo presentado .....	37
Figura 2.	Proceso de reciclaje de neumáticos de vehículos .....	38
Figura 3.	Material de caucho reciclado con aglomerante de poliuretano .....	39
Figura 4.	Forma de la probeta de tensión .....	40
Figura 5.	Montaje experimental de tensión .....	41
Figura 6.	Curva de tensión uniaxial . .....	42
Figura 7.	Geometría de las probetas para compresión uniaxial .....	43
Figura 8.	Curva de compresión uniaxial .....	44
Figura 9.	Montaje experimental de las probetas para compresión uniaxial .....	44
Figura 10.	Geometría de la probeta de ensayo a corte simple .....	45
Figura 11.	Probetas de ensayo a corte simple .....	45
Figura 12.	Montaje de la probeta de ensayo a corte simple .....	46
Figura 13.	Resultados experimentales de la prueba de corte simple .....	47
Figura 14.	Geometría de las probetas para creep .....	48
Figura 15.	Montaje de las probetas para creep .....	50
Figura 16.	Resultados experimentales de la prueba de creep .....	50
Figura 17.	Geometría de las probetas para relajamiento. ....	51
Figura 18.	Montaje de las probetas para relajamiento.....	52
Figura 19.	Resultados experimentales de la prueba de relajación .....	52
Figura 20.	Imagen de la calibración simultánea en MCalibration .....	55

Figura 21. Curvas calibradas: Tensión (UT).....	57
Figura 22. Curvas calibradas: Compresión (UC). ....	57
Figura 23. Curvas calibradas: Corte Simple (SS).....	57
Figura 24. Curvas calibradas: Fluencia (CP) .....	58
Figura 25. Curvas calibradas: Relajación (R). ....	58
Figura 26. Geometría FEA de las probetas para calibraciones de compresión cíclica y corte .....	60
Figura 27. Esquema de la carga del modelo FEA para calibraciones de compresión cíclica y corte .....	60
Figura 28. Protocolo de compresión cíclica .....	63
Figura 29. Montaje experimental de compresión cíclica .....	63
Figura 30. Resultados de la compresión cíclica.....	66
Figura 31. Protocolo de corte cíclico .....	67
Figura 32. Montaje experimental de corte cíclico .....	67
Figura 33. Resultados del corte cíclico: desplazamiento en el tiempo.....	69
Figura 34. Resultados del corte cíclico: tiempo-fuerza.....	70
Figura 35. Resultados del corte cíclico: fuerza – desplazamiento .....	70

## TABLA DE EQUACIONES

Ogden .....	31
Mooney Rivlin .....	31
Neo Hookean .....	31
Arruda Boyce .....	32
Bergstrom Boyce .....	32
Espectro de Prony .....	33
Rigidez Efectiva .....	61
Amortiguamiento .....	61
Energía .....	61

## ABSTRACT

Seismic hazards pose a significant threat to structures worldwide, with conventional rubber base isolators being cost-prohibitive for developing countries. This study investigates recycled rubber (RR) simulations as an alternative approach for seismic isolator testing and performance prediction, aiming to reduce the need for extensive experimental testing through numerical modeling. The methodology involved characterizing an RR mix through multiple deformation modes (uniaxial compression and tension, simple shear, creep, and relaxation). Using an iterative error reduction method that considered all modes simultaneously, the Bergström-Boyce model achieved an average  $R^2$  value of 0.92 for the RR matrix alone. The calibration process was then extended to an RR-textile reinforcement prototype using distinct coefficients for different deformation intervals. The model achieved average errors of -10.5% in vertical stiffness, 5.2% in horizontal stiffness, and 8.0% in damping ratio when compared to experimental data, demonstrating its potential for predicting isolator behavior. This research contributes to the UN's Sustainable Development Goals by examining sustainable and resilient infrastructure solutions through the use of recycled materials in earthquake-resistant structures.

**Key Words:** Recycled Rubber, Hyperelastic, Viscoelastic, Finite element modelling (FEM), Fiber reinforced earthquake isolators (FREI's).

## RESUMEN

Los peligros sísmicos representan una amenaza significativa para las estructuras en todo el mundo, y los aisladores convencionales a base de caucho tienen un costo prohibitivo para los países en desarrollo. Este estudio investiga las simulaciones de caucho reciclado (RR) como un enfoque alternativo para las pruebas de aisladores sísmicos y la predicción del rendimiento, con el objetivo de reducir la necesidad de pruebas experimentales extensas a través del modelado numérico. La metodología consistió en caracterizar una mezcla RR a través de múltiples modos de deformación (compresión y tensión uniaxial, corte simple, fluencia y relajación). Utilizando un método iterativo de reducción de errores que consideraba todos los modos simultáneamente, el modelo de Bergström-Boyce logró un valor medio de  $R^2$  de 0,92 sólo para la matriz RR. A continuación, el proceso de calibración se amplió a un prototipo de refuerzo textil RR utilizando distintos coeficientes para diferentes intervalos de deformación. El modelo logró errores promedio de -10.5% en rigidez vertical, 5.2% en rigidez horizontal y 8.0% en relación de amortiguamiento en comparación con los datos experimentales, lo que demuestra su potencial para predecir el comportamiento del aislador. Esta investigación contribuye a los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la ONU al examinar soluciones de infraestructura sostenibles y resilientes mediante el uso de materiales reciclados en estructuras resistentes a los terremotos.

**Palabras clave:** Caucho reciclado, Hiperelásticidad, Viscoelásticidad, Modelado de elementos finitos (FEM), Aisladores sísmicos reforzados con fibra (FREI's).



## 1. INTRODUCCIÓN

Los diversos entornos geológicos y las actividades tectónicas del mundo exponen a numerosas regiones a importantes peligros sísmicos, lo que da lugar a una compleja interacción de fuerzas geológicas y potencial de terremotos destructivos (Costa & Audin, 2021; Lizarazo et al., 2021). En respuesta a esta vulnerabilidad global, el aislamiento de bases sísmicas ha surgido como una solución prometedora, ya que permite que las estructuras se desacoplen del movimiento del suelo durante los eventos sísmicos y reduzcan sustancialmente la transmisión de fuerzas sísmicas (Kelly & Konstantinidis, 2011). Sin embargo, la adopción generalizada de sistemas tradicionales de aislamiento de bases, particularmente en países en desarrollo como Colombia, a menudo se ve obstaculizada por consideraciones de costos y desafíos logísticos (Kang et al., 2003; Losanno et al., 2019; Meza-Muñoz et al., 2024; Rivas-Ordóñez et al., 2024). Esto ha estimulado una amplia investigación para desarrollar aisladores de base rentables que se adapten a las necesidades y limitaciones específicas de las regiones que enfrentan altos riesgos sísmicos, con el objetivo de mejorar la resiliencia de las comunidades vulnerables (Losanno et al., 2022; Madera et al., 2019; Madera Sierra, Marulanda Casas, et al., 2019).

A lo largo de la historia de la ingeniería sísmica, el caucho natural ha sido ampliamente utilizado en sistemas de aislamiento de base debido a sus excepcionales propiedades de amortiguación y capacidad de disipación de energía (Kelly, 1997). Sin embargo, los desafíos contemporáneos relacionados con la disponibilidad y la sostenibilidad del caucho natural (Ho et al., 2023; Qi et al., 2023; Samešová et al., 2023), han llevado a una dirección de investigación innovadora centrada en la utilización del caucho reciclado de neumáticos desechados como material fundamental para los aisladores sísmicos. Este cambio se alinea estrechamente con los Objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas, en particular el ODS 12 (Producción y consumo responsables), el ODS 13 (Acción por el clima) y el ODS 9 (Industria, innovación e infraestructura).

La caracterización mecánica de matrices de caucho en aisladores sísmicos es importante para comprender las propiedades de absorción de energía, la resiliencia del aislador y lograr un control preciso sobre la respuesta sísmica (Kelly, 1997; Kelly & Konstantinidis, 2011). Las complejas relaciones tensión-deformación del caucho se caracterizan por ser hiperelásticas, lo que refleja su capacidad para deformarse ampliamente bajo cargas variables y volver a su forma original (Melly et al., 2021). Este comportamiento no lineal se representa normalmente a través de modelos hiperelásticos. Además, las propiedades viscoelásticas del caucho, que combinan características viscosas y elásticas (Brown, 2006), juegan un papel importante en los sistemas de aislamiento sísmico. Esta respuesta dependiente del tiempo explica la disipación de energía del material a lo largo del tiempo, una característica vital para la absorción efectiva de la energía sísmica y el aislamiento de vibraciones (Christensen, 1982; Habieb, 2020).

En los últimos años, una amplia investigación se ha centrado en el desarrollo y la caracterización de aisladores elastoméricos reforzados con fibra no adherida (UFREI). Spizzuoco et al. investigaron los rodamientos reforzados con fibra de caucho reciclado de carbono cuadrado no adherente de bajo costo (RR-FRB). a través de ensayos experimentales de compresión, ensayos de corte y análisis de elementos finitos (FEA), con hallazgos que respaldaron la eficacia de los aisladores no adheridos para reducir hasta un 80% la rigidez de los aisladores adheridos validados mediante la comparación de los resultados de FEA con los datos experimentales. Posteriormente, se desarrollaron e implementaron modelos completos de UFREI en software FEA, por diversos investigadores, considerando el comportamiento no lineal, de endurecimiento e histórico (Habieb, 2020; Habieb et al., 2018, 2019b, 2019a, 2021, 2022). Habieb demostró que el caucho de monómero de etileno propileno dieno (EDPM) reactivado, un tipo de caucho reciclado, era factible de ser utilizado en el aislamiento sísmico, también desarrolló modelos numéricos utilizando pruebas de compresión, tensión y fluencia (Habieb, 2020). Ampliando aún más la comprensión del comportamiento de FREI, Van Ngo et al. evaluaron la rigidez horizontal de los prototipos de U-FREI bajo carga cíclica, lo que llevó a un enfoque analítico que incorpora la no linealidad del módulo de corte y el área de corte efectiva utilizando el

modelo de Ogden para la hiperelasticidad y la serie Prony para la viscoelasticidad (Van Ngo et al., 2017), lo que demuestra el mayor beneficio de los U-FREI en la eficiencia del aislamiento sísmico.

Centrándose en el comportamiento compresivo simulado de los aisladores elastoméricos reforzados con fibra rectangular modificada (MR-FREI), los investigadores investigaron el efecto de las modificaciones geométricas en la rigidez vertical, el módulo de compresión y las distribuciones de tensiones y deformaciones mediante modelos de elementos finitos (Osgooei et al., 2015; Van Engelen, 2019; Van Engelen et al., 2014, 2019). El modelo FEA desarrollado por Van Engelen et al., verificó, contra datos experimentales, la influencia de las modificaciones geométricas en la rigidez vertical y el módulo de compresión, demostrando que las simulaciones son una herramienta viable en la investigación y predicción de FREIs, pero su alcance se limitó solo a los ensayos de compresión (Van Engelen et al., 2014). En un estudio relacionado, se propuso un aislador sísmico de plástico reforzado con fibra (FRP), con su rendimiento mecánico evaluado a través de varias pruebas experimentales y simulaciones numéricas utilizando software FEA (Wang et al., 2023).

Una comparación exhaustiva de 85 modelos hiperelásticos para nanocompuestos de caucho sin relleno y con relleno por He et al. (He et al., 2022) , identificó los modelos de mejor rendimiento para diferentes tipos de caucho y modos de deformación, mostrando la importancia de elegir el modelo numérico correcto para cada tipo de caucho, siendo los más comunes los modelos de Ogden y Neo-Hookean, pero esta investigación calibró cada modelo para un modo de deformación individual (He et al., 2022). Siguiendo esta línea de trabajo, se desarrolló un modelo visco-hiperelástico en 3D por Khajehsaeid et al. (Khajehsaeid et al., 2014), considerando la dependencia no lineal de la viscosidad en la velocidad de deformación e implementado vía programación en Abaqus, el alcance se limitó a pruebas de compresión y extensión, encontraron que incluir consideraciones viscoelásticas numéricas dan como resultado modelos de simulación mejorados (Khajehsaeid et al., 2014).

El comportamiento dependiente de la velocidad del caucho natural relleno (NR) y el caucho de alta amortiguación (HDR) se investigó posteriormente utilizando un modelo de viscoelasticidad de deformación finita de Amin et al. (Amin et al., 2006). Esta investigación introdujo un esquema analítico para identificar la ecuación constitutiva de la viscosidad a partir de pruebas de relajación e incorporó una ecuación de evolución basada en la ley de potencia para la viscosidad. La precisión y la eficacia se verificaron comparando los resultados con las pruebas experimentales de compresión y corte, así como con las pruebas de relajación, lo que demuestra que los nuevos modelos numéricos podrían tener mejores ajustes con el comportamiento del caucho de alta amortiguación (HDR) y del caucho natural (NR) (Wan et al., 2024).

Si bien las propiedades del caucho natural y los aisladores tradicionales están bien estudiadas, existen brechas de investigación con respecto a los aisladores de bajo costo y los materiales de caucho reciclado (RRM). Para abordar esto, Madera et al. (Madera et al., 2019) , Investigó y desarrolló aisladores reforzados con fibra de bajo costo utilizando refuerzo textil de poliéster unido con adhesivo de poliuretano. Losanno et al. (Madera et al., 2019), amplió esta investigación al probar aisladores sísmicos reforzados con fibra no adherida (U-FREI) hechos de caucho natural, demostrando la viabilidad de reemplazar el refuerzo de carbono convencional con fibras de poliéster, las muestras se probaron en pruebas de compresión, corte, monotónica, cíclica y de carga mantenida. Este trabajo se amplió posteriormente sustituyendo la matriz de caucho natural por caucho granulado reciclado, reduciendo significativamente los costos por Ortega et al. (Ortega, 2022)ero su alcance se limitó a las pruebas experimentales. Los estudios comparativos realizados por Losanno et al. sobre las capacidades de amortiguación de prototipos de RRM con aisladores de caucho natural arrojaron resultados satisfactorios, sugiriendo la viabilidad de estos nuevos aisladores (Losanno et al., 2022).

A lo largo de estos esfuerzos de investigación, una limitación clave han sido los altos costos experimentales asociados con los materiales, la mano de obra, las pruebas y el análisis. Esto ha generado la necesidad de estrategias de reducción de costos, con la experimentación numérica emergiendo como una posible solución. RRM exhibe

comportamientos viscoelásticos e hiperelásticos complejos debido a su composición y proceso de fabricación únicos (Ho et al., 2023; Qi et al., 2023; Samešová et al., 2023). El desarrollo de modelos numéricos precisos para simular los resultados experimentales podría resultar valioso para reducir costos y predecir el comportamiento mecánico de estos nuevos aisladores.

En respuesta a estos desafíos y oportunidades, esta tesis presenta los resultados de un programa experimental que investiga un RRM utilizado en aisladores sísmicos reforzados con fibra de caucho reciclado (RR-FREI). El estudio tiene como objetivo caracterizar el comportamiento mecánico en términos de hiperelasticidad y viscoelasticidad. La investigación, que se llevó a cabo en dos fases, primero probó el RRM en diferentes modos de deformación (tensión y compresión uniaxial, corte puro, fluencia y relajación) para obtener propiedades mecánicas experimentales. La segunda fase consistió en el ajuste de los modelos hiperelásticos y viscoelásticos a los datos experimentales, calibrando simultáneamente todos los modos de deformación, con modelos numéricos utilizando ANSYS (ANSYS Inc.) y MCalibration (PolyUMod) configurados para validar los parámetros mediante la comparación de las curvas de fuerza y desplazamiento de prototipos experimentales de RRM sometidos a ensayos de compresión cíclica y corte utilizando el método de raíz cuadrada ( $R^2$ ).

## 2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

### 2.1. Planteamiento del problema

Entre los años 2000 y 2019, se registraron un total de 7,348 desastres a nivel mundial, de los cuales los terremotos representaron una amenaza significativa, siendo responsables del 58% (721,318) de las 1,230,000 víctimas registradas (UNESCO, 2022). Estos datos demuestran la importancia de abordar el problema de la amenaza sísmica en la actualidad. Además, se destaca que el colapso de estructuras durante los sismos es responsable de la muerte del 80% de las víctimas, lo que resalta la necesidad de mejorar la resistencia de las estructuras ante estos eventos (UNESCO, 2022). Una técnica atractiva para mejorar el desempeño de las estructuras en eventos sísmicos es el aislamiento de base. Sin embargo, las técnicas tradicionales, como el uso de aisladores de caucho natural con discos de refuerzo de acero, presentan desafíos significativos en términos de precio, peso y costos adicionales de importación que pueden oscilar entre 7,000 y 25,000 USD, además del 21% correspondiente a los costos de importación (Madera, 2018).

Debido a lo anterior, la utilización del caucho reciclado en la matriz de aisladores sísmicos ha emergido como una alternativa sostenible y económica en la construcción de estructuras resilientes ante eventos sísmicos. Sin embargo, antes de su implementación generalizada, es crucial comprender en profundidad las características hiperelásticas y viscoelásticas de este material. Estas propiedades mecánicas influyen directamente en la capacidad de los aisladores sísmicos para disipar y absorber la energía sísmica, garantizando así la protección de las estructuras. Por lo tanto, la determinación precisa de estas características es esencial para evaluar el rendimiento y la durabilidad de los aisladores sísmicos que utilizan caucho reciclado.

La determinación de las propiedades de la matriz de los aisladores presenta complejidades debido al comportamiento mecánico del caucho, el cual exhibe características hiperelásticas y viscoelásticas debido a su alta capacidad de deformación

(Yenigun et al., 2022). Tradicionalmente, se requieren múltiples ensayos, como tensión uniaxial, planar biaxial y volumétrico, para determinar estas propiedades, lo que implica un consumo significativo de tiempo y recursos (Yenigun et al., 2022). Esta complejidad dificulta el desarrollo de nuevas tecnologías en este campo.

Para abordar estas problemáticas, han surgido nuevas metodologías que buscan reducir el costo y la complejidad de obtener las constantes de los materiales. Estas metodologías combinan enfoques como el uso de modelos de elementos finitos con resultados experimentales más accesibles, como las curvas de fuerza-desplazamiento (Íñiguez-Macedo et al., 2019). Esta combinación de técnicas permite obtener información más precisa sobre el comportamiento del caucho y agilizar el proceso de determinación de las propiedades de la matriz de los aisladores.

El comportamiento hiperelástico del caucho reciclado es una de las principales problemáticas a abordar en esta investigación. Se pretende evaluar su respuesta mecánica frente a cargas de compresión y tracción, y ajustar estos datos a modelos constitutivos hiperelásticos. Mediante la realización de ensayos experimentales, se busca obtener datos confiables para ajustar el caucho reciclado a los diferentes modelos y así comprender su comportamiento elástico no lineal con mayor precisión.

Además del comportamiento hiperelástico, la viscoelasticidad del caucho reciclado es otro aspecto crucial para investigar. La capacidad de este material para deformarse y recuperarse con el tiempo bajo cargas cíclicas es de gran importancia en el diseño de aisladores sísmicos. Para caracterizar su respuesta viscoelástica. Mediante pruebas de carga-descarga y la obtención de datos experimentales se puede comprender su comportamiento viscoelástico y su influencia en la capacidad de disipación de energía.

En resumen, el estudio de las propiedades hiperelásticas y viscoelásticas del caucho reciclado utilizado en la matriz de aisladores sísmicos es de vital importancia para mejorar la resistencia de las estructuras ante eventos sísmicos. Sin embargo, existen desafíos significativos relacionados con el costo, la complejidad y la determinación precisa de estas propiedades. El uso de nuevas metodologías, como la combinación de modelos

de elementos finitos y resultados experimentales más asequibles, ofrece una prometedora alternativa para abordar estas problemáticas y avanzar en el desarrollo de tecnologías más eficientes y accesibles en este campo (Íñiguez-Macedo et al., 2019).

Los resultados obtenidos en esta investigación tendrán implicaciones significativas en la ingeniería sísmica. La comprensión detallada de las características hiperelásticas y viscoelásticas del caucho reciclado permitirá a los ingenieros evaluar con mayor precisión el rendimiento de los aisladores sísmicos y mejorar la eficiencia y la seguridad de las estructuras en zonas sísmicas



### **3. OBJETIVOS DEL PROYECTO**

#### **3.1. Objetivo general**

Determinar las características hiperelásticas y viscoelásticas del caucho reciclado de llantas mediante simulaciones híbridas para comprender los comportamientos elásticos y viscoelásticos del material.

#### **3.2. Objetivos específicos**

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

- Recopilar la información experimental del comportamiento hiperelástico y viscoelástico del caucho de llanta vehicular reciclada para caracterizar el material.
- Determinar las características hiperelásticas del caucho reciclado mediante simulaciones para compararlas con el caucho natural.
- Obtener las características viscoelásticas del caucho reciclado mediante simulaciones para compararlas con el caucho natural.

#### 4. JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO DE GRADO

La amenaza sísmica representa un desafío constante en la seguridad de las estructuras a nivel mundial. Los terremotos han demostrado su capacidad devastadora, causando pérdidas significativas de vidas humanas y daños materiales considerables. Durante el período de 2000 a 2019, se registraron 7,348 desastres naturales, con los terremotos responsables de más del 50% de las víctimas totales. Además, se ha observado que el colapso de las estructuras durante los sismos es la principal causa de muerte en estos eventos, representando el 80% de las víctimas. Estos datos resaltan la necesidad urgente de abordar el problema de la resistencia estructural en áreas sísmicas (UNESCO, 2022).

En este contexto, la técnica del aislamiento de base ha surgido como una estrategia efectiva para mejorar el rendimiento de las estructuras ante terremotos. Sin embargo, las técnicas tradicionales que utilizan aisladores de caucho natural con discos de refuerzo de acero presentan desafíos considerables en términos de costo, peso y dificultades en su importación. Estos factores pueden elevar los precios entre 7,000 y 25,000 USD, además de los costos adicionales de importación. Por lo tanto, es necesario explorar alternativas más sostenibles y económicas para la construcción de estructuras resilientes (Madera, 2018).

En otro enfoque, la investigación en hiperelasticidad y viscoelasticidad de cauchos de llanta reciclada para aisladores sísmicos contribuye a varios Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de las Naciones Unidas. Esta investigación fomenta la innovación en la industria y la infraestructura, promoviendo una economía circular y reduciendo la dependencia de materias primas vírgenes (ODS 9). Además, ayuda a crear comunidades y ciudades sostenibles, al utilizar materiales reciclados y fortalecer la capacidad de las estructuras para resistir los terremotos (ODS 11). También se alinea con el ODS 12, al promover la producción y el consumo responsables mediante el reciclaje de llantas y la prolongación de su vida útil. Por último, contribuye a la acción por el clima (ODS 13), al reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y promover la construcción de

infraestructuras resilientes ante los desastres naturales (Naciones Unidas, 2015). Esta investigación impulsa la sostenibilidad, la economía circular, la reducción de desechos, el consumo responsable y la adaptación al cambio climático, a través del uso de cauchos de llanta reciclada en aisladores sísmicos.

La determinación de las propiedades de la matriz de los aisladores sísmicos presenta desafíos debido al comportamiento mecánico del caucho reciclado. El caucho exhibe características hiperelásticas y viscoelásticas debido a su alta capacidad de deformación. Tradicionalmente, se requieren múltiples ensayos, como tensión uniaxial, planar biaxial y volumétrico, para determinar estas propiedades, lo que conlleva un consumo considerable de tiempo y recursos. Esta complejidad dificulta el desarrollo de nuevas tecnologías en este campo y la implementación efectiva del caucho reciclado en aisladores sísmicos (Yenigun et al., 2022).

Para superar estas problemáticas, han surgido nuevas metodologías que buscan reducir el costo y la complejidad de obtener las constantes de los materiales. Una de estas metodologías combina el uso de modelos de elementos finitos con resultados experimentales más accesibles, como las curvas de fuerza-desplazamiento. Esta combinación de técnicas permite obtener información más precisa sobre el comportamiento del caucho reciclado y agilizar el proceso de determinación de las propiedades de la matriz de los aisladores (Mackerle, 2004).

Mediante la creación de modelos virtuales del caucho reciclado, se pueden aplicar diferentes cargas y condiciones de deformación para simular su comportamiento hiperelástico y viscoelástico. Estas simulaciones permiten obtener datos precisos sobre las tensiones, deformaciones y respuestas del material en diversas situaciones, brindando información experimental virtual valiosa. Además, las simulaciones de elementos finitos pueden proporcionar detalles sobre el comportamiento a nivel microscópico del caucho reciclado, lo que contribuye a una caracterización más completa del material.

Al crear modelos virtuales de los materiales de referencia, tanto el caucho reciclado como el caucho natural, se pueden someter a diferentes condiciones de carga y

deformación para analizar sus comportamientos elásticos. A través de las simulaciones, se pueden obtener curvas de esfuerzo-deformación que representan las características hiperelásticas de cada material. Estas curvas pueden compararse y analizarse para determinar las diferencias y similitudes entre el caucho reciclado y el caucho natural, proporcionando una evaluación objetiva de las propiedades elásticas del material reciclado.

Las simulaciones permiten estudiar el comportamiento del material a lo largo del tiempo, considerando su capacidad de amortiguamiento y su respuesta ante cargas variables. Al comparar los resultados obtenidos para el caucho reciclado y el caucho natural, es posible evaluar las características viscoelásticas de ambos materiales y determinar si el caucho reciclado cumple con los requisitos necesarios para su implementación en la matriz de aisladores sísmicos.

Además, este estudio ofrece varias ventajas y beneficios. En primer lugar, la utilización del caucho reciclado en la matriz de los aisladores sísmicos representa una solución más sostenible desde el punto de vista ambiental. El reciclaje de llantas vehiculares desechadas reduce la generación de residuos y contribuye a la conservación de los recursos naturales al reutilizar un material que de otra manera podría terminar en vertederos o incinerarse, generando impactos negativos en el medio ambiente (Revista Semana, 2021).

En segundo lugar, la implementación de aisladores sísmicos con caucho reciclado podría tener un impacto económico positivo en la industria de la construcción. Los aisladores tradicionales basados en caucho natural con discos de refuerzo de acero suelen ser costosos, lo que limita su adopción en proyectos de construcción de menor presupuesto. Al utilizar caucho reciclado, se espera reducir significativamente los costos de producción de los aisladores sísmicos, lo que podría hacer que esta tecnología sea más accesible y asequible para una mayor cantidad de proyectos de construcción, especialmente en áreas propensas a terremotos (Madera, 2018).

Además, el desarrollo de nuevas metodologías para la determinación de las propiedades del caucho reciclado, como la combinación de modelos de elementos finitos con resultados experimentales más accesibles, permitirá agilizar el proceso de evaluación de los materiales y reducir los costos asociados. Esto abrirá oportunidades para una mayor investigación y desarrollo en el campo de la ingeniería sísmica, promoviendo la innovación y la mejora continua de las tecnologías utilizadas en la construcción de estructuras resistentes a los terremotos (Ortega et al., 2023a).

En cuanto a la relevancia social, este trabajo de grado contribuirá a mejorar la seguridad de las personas que habitan en áreas sísmicas. La implementación de aisladores sísmicos eficientes y accesibles en las estructuras permitirá reducir el riesgo de colapso durante los terremotos, salvaguardando así la vida de las personas y minimizando las pérdidas humanas y materiales. Esto es especialmente relevante en regiones con alta actividad sísmica, donde la infraestructura resiliente es crucial para proteger a la población y garantizar la continuidad de las actividades sociales y económicas (Spizzuoco et al., 2014).

En conclusión, este trabajo de grado tiene como objetivo determinar las características hiperelásticas y viscoelásticas del caucho reciclado utilizado en la matriz de aisladores sísmicos, con una sólida justificación basada en la necesidad de abordar la amenaza sísmica, mejorar la resistencia estructural, promover la sostenibilidad ambiental y fomentar la innovación en la industria de la construcción. Los resultados de esta investigación proporcionarán información valiosa para la evaluación y diseño de aisladores sísmicos más eficientes y accesibles, contribuyendo así a la seguridad de las personas en áreas sísmicas y al avance de la ingeniería sísmica. Al comprender en profundidad las propiedades del caucho reciclado, se podrá evaluar con mayor precisión el rendimiento y comportamiento de los aisladores sísmicos, lo que contribuirá al desarrollo de tecnologías más eficientes y accesibles en el campo de la ingeniería sísmica, al mismo tiempo que se exploran alternativas sostenibles y económicas en la construcción.

## **5. MARCO DE REFERENCIA**

### **5.1. Antecedentes**

Durante décadas, se ha investigado ampliamente sobre los parámetros hiperelásticos y viscoelásticos del caucho, ya que son fundamentales para comprender y predecir su comportamiento mecánico, dado su carácter altamente versátil.

Los primeros estudios sobre estos parámetros datan de la primera mitad del siglo XX, período en el cual los investigadores se enfocaron en desarrollar técnicas experimentales para caracterizar el comportamiento mecánico del caucho. Los ensayos de tracción y compresión se utilizaron ampliamente y los resultados obtenidos se ajustaron a modelos constitutivos sencillos, como el modelo de Hooke, para describir la elasticidad lineal del material.

Sin embargo, a medida que se profundizaba en el estudio del caucho, se observó que este no seguía la ley de Hooke y presentaba un comportamiento altamente no lineal. Esto generó la necesidad de desarrollar modelos constitutivos más sofisticados capaces de describir con precisión dicho comportamiento y predecir su respuesta mecánica bajo distintas condiciones de carga.

A partir de la década de 1960, se produjeron importantes avances en la obtención de los parámetros hiperelásticos del caucho. Se desarrollaron modelos constitutivos más sofisticados, como el modelo de Ogden y el modelo de Mooney-Rivlin, los cuales permitieron describir de manera precisa el comportamiento no lineal del material. Estos modelos se ajustaron utilizando funciones de energía de deformación obtenidas a partir de ensayos experimentales de tracción y compresión (Kim et al., 2012).

El modelo de Ogden, propuesto en 1972, y el modelo de Mooney-Rivlin, formulado en la década de 1940 por James Mooney, fueron algunos de los primeros modelos teóricos utilizados para describir el comportamiento hiperelástico del caucho. Estas ecuaciones se han utilizado ampliamente en la industria del caucho para predecir su comportamiento mecánico (Mooney, 1940; Ogden, 1972).

Además de los modelos constitutivos, también se realizaron avances en las técnicas de medición de deformación. La extensometría óptica y la correlación de imágenes digitales se introdujeron como métodos precisos para medir la deformación durante los ensayos experimentales, lo cual permitió obtener datos más precisos y confiables y, a su vez, mejorar la obtención de los parámetros hiperelásticos (Yang et al., 2019).

Posteriormente, en 1992, los ingenieros A. Johnson y C. Quigley propusieron un modelo de comportamiento viscoelástico del caucho basado en el modelo de Maxwell. Dicho modelo describe el comportamiento viscoelástico del caucho como una combinación de elementos elásticos y viscosos, siendo más preciso para predecir los efectos de relajación en el material (Johnson & Quigley, 1992).

La determinación de los parámetros hiperelásticos y viscoelásticos del caucho ha requerido el uso de diversas técnicas experimentales, como los ensayos de tracción y compresión. Además, se han desarrollado modelos numéricos más sofisticados para simular su comportamiento mecánico en situaciones complejas, como la deformación bajo cargas cíclicas o la respuesta a impactos (Charlton et al., 1994).

La caracterización de los parámetros viscoelásticos del caucho ha supuesto un desafío debido a su comportamiento temporal y dependiente de la temperatura. A partir de la década de 1970, se lograron avances significativos en este campo, introduciendo nuevos ensayos experimentales, como los de relajación y creep, los cuales proporcionaron datos viscoelásticos relevantes (Kleuter et al., 2007).

En los ensayos de relajación, se aplica una deformación constante al caucho y se registra la disminución de la tensión a lo largo del tiempo, brindando información sobre su comportamiento viscoelástico. Por otro lado, los ensayos de creep implican la aplicación de una carga constante al caucho durante un período prolongado, y se mide la deformación resultante. Estos datos experimentales se ajustaron a modelos constitutivos viscoelásticos, como el modelo de Kelvin-Voigt y el modelo de Maxwell, utilizando técnicas de optimización para determinar los parámetros viscoelásticos del caucho (Johnson et al., 1995).

A partir de la década de 1990, se comenzaron a utilizar técnicas de simulación numérica, como el método de elementos finitos, para predecir el comportamiento mecánico del caucho en diferentes situaciones. Estas técnicas permiten simular el comportamiento del material ante cargas complejas y predecir su respuesta en distintas condiciones de carga (Nicholson & Nelson, 1990). Conforme avanzaba la investigación, se reconoció la importancia de combinar técnicas experimentales y simulaciones numéricas para obtener parámetros hiperelásticos y viscoelásticos más precisos. Las simulaciones de elementos finitos (SEF) se convirtieron en una herramienta clave en este proceso, ya que permiten predecir el comportamiento mecánico del caucho y compararlo con los resultados experimentales (Mackerle, 2004). Las SEF proporcionan un enfoque computacional para simular el comportamiento del caucho ante diversas condiciones de carga y deformación. Utilizando modelos constitutivos apropiados, como los modelos de Ogden, Mooney-Rivlin, Yeoh, polinomial y polinomial reducido, las simulaciones pueden representar con precisión el comportamiento no lineal y viscoelástico del caucho. Al comparar los resultados de las simulaciones con los datos experimentales, se pueden ajustar los parámetros hiperelásticos y viscoelásticos del modelo para mejorar la precisión de las predicciones (Ali et al., 2010). Para llevar a cabo simulaciones numéricas de elementos finitos del comportamiento del caucho, se requieren modelos constitutivos adecuados que describan su comportamiento no lineal y viscoelástico. A lo largo de los años, se han desarrollado varios modelos constitutivos para el caucho, como los modelos de Ogden, Mooney-Rivlin, Yeoh, polinomial y polinomial reducido (Holzapfel & Gasser, 2001). Estos modelos se basan en funciones de energía de deformación que describen las propiedades mecánicas del caucho en función de sus parámetros hiperelásticos y viscoelásticos. La combinación de técnicas experimentales y simulaciones de elementos finitos permite ajustar estos modelos a los datos experimentales y obtener valores precisos de los parámetros del caucho (Kleuter et al., 2007; Nicholson et al., 1998).



## 5.2. Estado del arte

Se han llevado a cabo diversos trabajos utilizando simulaciones de elementos finitos para calibrar los modelos constitutivos hiperelásticos y viscoelásticos del caucho. Por ejemplo, (Nicholson et al., 1998; Nicholson & Nelson, 1990) realizaron un análisis de elementos finitos de materiales hiperelásticos, destacando la utilidad de la modelación y señalando desafíos como la incompresibilidad, deformaciones grandes y zonas de contacto variable.

Se ha aplicado el aprendizaje automático y las redes neuronales para obtener parámetros hiperelásticos y viscoelásticos del caucho a partir de datos simulados. Estas técnicas de inteligencia artificial permiten analizar grandes conjuntos de datos y encontrar correlaciones complejas entre las variables, lo que mejora la eficiencia y precisión de la modelación (Trebar et al., 2007)

En 2014, Moran et al. caracterizaron hiperelásticamente el tejido humano cerebral mediante ensayos mecánicos de tensión, compresión y cortante simple. Utilizaron una calibración en ABAQUS con un módulo de optimización en MATLAB y encontraron que los modelos "Hyperfoam", Ogden y Polinomial eran los más adecuados para describir el comportamiento mecánico del tejido cerebral (Moran et al., 2014).

En 2014, Van Engelen et al. estudiaron el comportamiento a compresión de aisladores MR-FREI mediante modificaciones geométricas. Los autores realizaron ensayos de compresión vertical y análisis de elementos finitos en MSC Marc, validando su modelo al comparar con datos experimentales de cuatro aisladores y utilizándolo posteriormente para estudios paramétricos de la influencia de modificaciones circulares (Van Engelen et al., 2014).

En 2014, Spizzuoco et al. investigaron aisladores de bajo costo reforzados con fibra de carbono y matriz de caucho reciclado mediante ensayos experimentales de compresión y cortante. Los autores realizaron análisis de elementos finitos en MARC MSC Software y

validaron sus resultados comparando las curvas de fuerza-desplazamiento experimental y numérica, encontrando que los aisladores no adheridos reducían hasta un 80% la rigidez respecto a los adheridos (Spizzuoco et al., 2014).

En 2017, el ingeniero Andrés Muñoz determinó las propiedades hiperelásticas y viscoelásticas del elastómero que fueron usadas en un aislador sísmico desarrollado en Colombia mediante ensayos pseudo-estáticos, de larga duración. Realizó el ajuste de seis modelos hiperelásticos concluyendo que el modelo de Ogden de segundo orden era el que mejor se ajustaba al comportamiento experimental, convergiendo en valores de deformación al 280% en tensión, 37% en compresión y 330% en cortante. En la parte viscoelástica logró un ajuste del 97.7% usando tres términos de la serie de Prony (Muñoz Bermudez, 2017).

En 2017, Van Ngo et al. evaluaron la rigidez horizontal de aisladores reforzados con fibra mediante ensayos cíclicos de cortante. Los autores utilizaron el modelo de Ogden para hiperelasticidad y series de Prony para viscoelasticidad en ANSYS, validando su enfoque analítico contra resultados experimentales y numéricos, demostrando que predecía adecuadamente la variación de rigidez horizontal (Van Ngo et al., 2017).

En 2018, la doctora Ingrid Madera realizó un desarrollo tecnológico de un aislador sísmico de bajo costo para edificaciones bajas mediante 5 fases que incluyen una fase experimental para caracterizar el caucho de alto amortiguamiento, una de construcción y evaluación de los prototipos, una de diseño de un aislador para una estructura, una de diseño analítico de los aisladores y una final de análisis de estructuras aisladas, donde se concluyó que los aisladores de caucho de alto desempeño exhibían características adecuadas para el aislamiento de base, alcanzando valores de amortiguamiento mayores al 10% con módulos de corte de 0.6 MPa y 600% de elongación, ajustando el comportamiento hiperelástico al modelo de Ogden de segundo orden y modelando la viscoelasticidad usando tres términos de la serie de Prony (Madera, 2018).

En 2019, Madera et al. desarrollaron aisladores de bajo costo utilizando refuerzo textil de poliéster y caucho natural. Los autores realizaron ensayos de compresión, cortante

y carga mantenida, validando el comportamiento mediante análisis de elementos finitos en ANSYS y comparando las predicciones numéricas con resultados experimentales de prototipos (Madera et al., 2019; Madera Sierra, Marulanda Casas, et al., 2019).

En 2019, Íñiguez-Macedo et al. propusieron una metodología que combinaba modelo adaptativo, ensayos mecánicos estándar y el método de respuesta múltiple de superficie (MRS) para obtener los invariantes y constantes hiperelásticas de diferentes tipos de caucho. Los autores encontraron que esta metodología era eficaz para reducir los costos y complejidades del procedimiento experimental estándar (Íñiguez-Macedo et al., 2019).

En 2020, Habieb desarrolló un estudio sobre aisladores elastoméricos con caucho EPDM reactivado mediante ensayos de compresión, tensión y fluencia. El autor implementó un elemento de usuario en ABAQUS para simular el comportamiento no lineal y de endurecimiento, validando sus resultados con datos experimentales de prototipos sometidos a cargas cíclicas (Habieb, 2020).

En otro enfoque en 2021 se realizó un estudio más detallado sobre la influencia de la estructura molecular del caucho en su comportamiento hiperelástico y viscoelástico. Donde se encontró que la incorporación de información molecular en los modelos constitutivos mejora la precisión de la modelación. Estos estudios han destacado la importancia de comprender la estructura a nivel molecular para obtener resultados más precisos (Zhang et al., 2021).

En 2022, He et al. realizaron un estudio comparativo de 85 modelos hiperelásticos para cauchos con y sin relleno mediante ensayos uniaxiales, equibiaxiales y de tensión plana. Los autores implementaron los modelos más efectivos usando subrutinas UHYPER en Abaqus y compararon tiempos computacionales y distribuciones de esfuerzos para identificar los modelos más apropiados (He et al., 2022).

En 2023, Ortega et al. expandieron el trabajo previo de Madera et al. reemplazando el caucho natural por caucho reciclado en aisladores de bajo costo. Los autores realizaron una extensa campaña experimental incluyendo ensayos de caracterización del material y

pruebas de prototipos, comparando el desempeño con aisladores tradicionales de caucho natural (Ortega et al., 2023a).

En resumen, los avances en la modelación de la hiperelasticidad y viscoelasticidad del caucho se han centrado en mejorar la precisión y adaptabilidad de los modelos. La integración de técnicas de inteligencia artificial, estudios detallados de la estructura molecular, calibración mediante simulaciones de elementos finitos y la aplicación de metodologías novedosas han demostrado ser herramientas útiles para obtener parámetros hiperelásticos y viscoelásticos del caucho de manera más eficiente y precisa, reduciendo así los costos y el tiempo requerido en los procedimientos experimentales tradicionales.

### **5.3. Marco teórico**

#### **5.3.1. Aisladores sísmicos**

Un aislador de base sísmica de caucho es un dispositivo utilizado en la ingeniería estructural para mitigar los efectos de los terremotos en las estructuras. Consiste en un material de caucho o elastómero que se coloca entre la base de la estructura y el suelo. El objetivo principal de este dispositivo es reducir la transmisión de vibraciones y la transferencia de fuerzas sísmicas a la superestructura durante un evento sísmico (Madera, 2018).

El fundamento teórico detrás de los aisladores de base sísmica de caucho se basa en los principios de la dinámica estructural y el comportamiento mecánico de los materiales. Algunos de los conceptos clave involucrados son las características del caucho, el período de oscilación, el coeficiente de aislamiento sísmico y el análisis estructural dinámico (Kelly, 1997).

El caucho utilizado en los aisladores de base sísmica tiene propiedades mecánicas únicas, como su alta capacidad de deformación y su comportamiento viscoelástico. Estas características permiten que el material absorba y disipe la energía sísmica a medida que se deforma, reduciendo así la transmisión de vibraciones a la estructura.

Cada estructura tiene un período de oscilación característico, que depende de su rigidez y masa. Los aisladores de base sísmica de caucho se diseñan para tener un período de oscilación diferente al de la estructura, lo que ayuda a desacoplarla del movimiento sísmico del suelo. Esto reduce la respuesta estructural y la amplitud de las vibraciones (Chopra, 2012).

El coeficiente de aislamiento sísmico es una medida de la eficacia del aislador de base en reducir la transmisión de vibraciones sísmicas. Se basa en factores como la rigidez, la capacidad de deformación y la geometría del aislador. Un coeficiente de aislamiento sísmico más alto indica una mejor capacidad del aislador para reducir la respuesta estructural ante un evento sísmico (Chopra, 2012).

El comportamiento de un edificio o estructura equipado con aisladores de base sísmica de caucho se analiza mediante métodos de análisis estructural dinámico. Esto implica modelar la estructura y los aisladores en un software de simulación y evaluar su respuesta bajo diferentes condiciones de carga sísmica (Kelly, 1997).

En términos generales, los aisladores de base sísmica de caucho se basan en el uso de materiales de caucho o elastómero con propiedades únicas para reducir la transferencia de vibraciones sísmicas y las fuerzas a las estructuras. Su diseño y funcionamiento se fundamentan en principios de la dinámica estructural y el comportamiento mecánico de los materiales.

### **5.3.2. Hiperelasticidad**

La hiperelasticidad es una propiedad mecánica que describe la capacidad de ciertos materiales para deformarse significativamente bajo una carga aplicada y luego recuperar su forma original una vez que se elimina la carga. Los materiales que exhiben esta propiedad se conocen como materiales hiperelásticos, siendo el caucho uno de los materiales más conocidos. El comportamiento hiperelástico del caucho se puede explicar mediante la teoría de la deformación finita, que se basa en la idea de que la deformación no puede ser considerada como pequeña en relación con las dimensiones originales del material. Por lo tanto, la teoría de la deformación finita es adecuada para describir la deformación del caucho en una variedad de situaciones, incluyendo la compresión, la tracción y el corte.

A continuación, se presentan las ecuaciones constitutivas de algunos modelos hiperelásticos comunes junto con el significado de sus variables:

#### **5.3.2.1. Ogden**

El modelo de Ogden es un modelo hiperelástico que representa la función de densidad de energía de deformación como una suma de términos, cada uno definido por un estiramiento principal y parámetros de material. Captura eficazmente la gran respuesta de

deformación de los cauchos (Ogden, 1997). El modelo puede ajustar con precisión los datos experimentales en una amplia gama de deformaciones.

$$W = \sum_{i=1}^N \frac{\mu_i}{\alpha_i} (\lambda_1^{\alpha_i} + \lambda_2^{\alpha_i} + \lambda_3^{\alpha_i} - 3) \quad (Eq 1.)$$

Donde  $\mu_i$  y  $\alpha_i$  son parámetros del material dependientes de la temperatura, y  $\lambda_i$  son los directores principales desviadores.

### 5.3.2.2. Mooney Rivlin

El modelo Mooney-Rivlin es un modelo hiperelástico sencillo y robusto muy utilizado para cauchos. Expresa la densidad de energía de deformación como una función lineal de dos invariantes de deformación (Mooney, 1940). El modelo funciona bien a deformaciones de bajas a moderadas (Kim et al., 2012). Se trata de dos parámetros materiales que se ajustan a los datos experimentales.

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) \quad (Eq 2.)$$

Donde  $I_1$  e  $I_2$  son el primer y segundo invariantes de deformación desviadora, y  $C_{10}$  y  $C_{01}$  son constantes del material.

### 5.3.2.3. Neo Hookean

El modelo neo-hookeano es el modelo hiperelástico más simple, con un solo parámetro de material. Utiliza una función de densidad de energía basada en el primer invariante de deformación. A pesar de su simplicidad, el modelo puede describir eficazmente el comportamiento de algunos elastómeros sometidos a deformaciones moderadas (Kim et al., 2012).

$$W = C_{10}(I_1 - 3) \quad (Eq 3.)$$

Donde  $C_{10}$  es un parámetro de material.

#### 5.3.2.4. Arruda Boyce

El modelo Arruda-Boyce caracteriza el comportamiento de endurecimiento por deformación de los cauchos. El modelo se adapta bien a grandes extensiones, pero es menos preciso para datos de deformación pequeños (Boyce & Arruda, 2000). Introduce un parámetro material para limitar la extensibilidad de la cadena basado en teorías de redes moleculares (Arruda & Boyce, 1993).

$$W = \frac{\mu}{2} (\lambda_m^2 - 1) \sum_{i=5}^N \frac{1}{i!} (\lambda_m - \lambda_m^{-1}) \quad (Eq 4.)$$

Donde  $\mu$  es el módulo de corte,  $\lambda_m$  es el tramo de bloqueo e  $i$  es el orden polinómico.

#### 5.3.2.5. Bergstrom Boyce

El modelo de Bergstrom-Boyce modifica la formulación de Arruda-Boyce para mejorar la precisión en pequeñas depresiones. Utiliza una expresión multiparamétrica de la densidad de energía de deformación para describir los regímenes de endurecimiento inicial y final de algunos elastómeros (J. Bergström, 2015).

$$W = \frac{\mu}{2} (I_1 - 3) + \frac{\mu}{20\lambda_m^2} (\lambda_m^2 - 1) \sum_{i=5}^N \frac{1}{i!} (\lambda_m - \lambda_m^{-1}) \quad (Eq 5.)$$

Donde  $\lambda_m$  representa la extensibilidad de la cadena límite.

#### 5.3.3. Viscoelasticidad

La viscoelasticidad es una propiedad mecánica de los materiales que combina características tanto elásticas como viscosas. Los materiales viscoelásticos exhiben tanto la capacidad de deformarse y recuperar su forma original elásticamente como la capacidad de fluir y deformarse lentamente viscosamente bajo la acción de una carga o un esfuerzo constantes. Esta respuesta se debe a la combinación de la resistencia elástica a corto plazo y la fluencia viscosa a largo plazo.



Estos materiales viscoelásticos presentan siete fenómenos según Roderick Lakes en su libro *Viscoelastic Solids* (Lakes, 2018):

1. Si el esfuerzo se mantiene constante, la deformación aumenta con el tiempo a lo cual se le llama “Creep”.
2. Si la deformación se mantiene constante, el esfuerzo disminuye con el tiempo conocido como “Relajamiento o Relaxation”.
3. El esfuerzo efectivo depende de la velocidad de aplicación de la carga.
4. Si se aplican cargas cíclicas, presentan comportamiento histérico, que conlleva a una disipación de energía mecánica.
5. Las ondas acústicas presentan atenuación.
6. La recuperación después de un impacto es menor al 100%.
7. Durante el deslizamiento del material, este presenta resistencia friccional.

En la viscoelasticidad, se utilizan varios modelos constitutivos para describir el comportamiento de los materiales. Uno de los modelos más útiles es:

#### 5.3.3.1. Espectro de Prony

La serie Prony es un modelo viscoelástico lineal que representa la fluencia y la relajación dependientes del tiempo mediante una suma de términos exponenciales. Cada término contiene un coeficiente y una constante de tiempo característica para describir la tasa de deformación o relajación. La forma matemática general consiste en el módulo de corte descompuesto en un módulo de equilibrio y una serie de Prony, en este artículo estamos utilizando la forma modificada del espectro de Prony que MCalibration (PolyUMod) usa.

$$g(t) = \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{t-t_m}{t_s} \right)^2 \right]^B \quad (\text{Eq 6.})$$

Donde  $t_m$  es el tiempo medio del espectro,  $t$  es la desviación estándar del espectro y  $B$  es un parámetro de forma.

### **5.3.4. Calibración inversa de materiales**

La calibración inversa de materiales es un proceso mediante el cual se ajustan los parámetros de un modelo constitutivo para que las predicciones del modelo se ajusten a los datos experimentales o a resultados conocidos. Es decir, en lugar de utilizar el modelo constitutivo para predecir el comportamiento del material, se utiliza información experimental para determinar los valores óptimos de los parámetros del modelo.

La calibración inversa de materiales es particularmente relevante en el campo de la mecánica de sólidos y materiales (Avril & Evans, 2017; Bard, 1973; Belytschko et al., 2014; Moaveni, 2015; Román et al., 2022; Tanaka & Dulikravich, 1998; Yenigun et al., 2022), donde se busca comprender y predecir el comportamiento mecánico de los materiales en diferentes condiciones de carga. Al ajustar los parámetros del modelo constitutivo a partir de datos experimentales, se mejora la capacidad del modelo para representar con precisión el comportamiento real del material.

La calibración inversa de materiales es un proceso iterativo y requiere un equilibrio entre la complejidad del modelo constitutivo y la disponibilidad y calidad de los datos experimentales. Un modelo bien calibrado puede mejorar la precisión y la confiabilidad de las predicciones del comportamiento mecánico del material, lo que es esencial en el diseño y análisis de estructuras y componentes.

#### **5.3.4.1. Algoritmos de calibración**

Los algoritmos de ajuste se refieren a métodos y técnicas utilizados para encontrar los valores óptimos de los parámetros en un modelo matemático o estadístico que mejor se ajusten a los datos observados. Estos algoritmos buscan minimizar una función objetivo que cuantifica la discrepancia entre los valores observados y los valores predichos por el modelo, al variar los valores de los parámetros.

A continuación, se mencionan algunas ecuaciones de los algoritmos de ajuste más comunes (Montgomery et al., 2012):

#### 5.3.4.1.1. Método de los mínimos cuadrados (Least Squares)

Es un enfoque clásico que busca minimizar la suma de los cuadrados de las diferencias entre los valores observados y los valores predichos por el modelo. La función objetivo es la suma de los residuos al cuadrado.

$$f(x) = \sum (y_i - f(x_i))^2$$

Donde  $y_i$  son los valores observados,  $f(x_i)$  son los valores predichos por el modelo y  $x$  son los parámetros por ajustar.

#### 5.3.4.1.2. Método de descenso de gradiente (Gradient Descent)

Es un algoritmo iterativo que se basa en el cálculo del gradiente de la función objetivo para realizar actualizaciones de los parámetros en dirección opuesta al gradiente. La ecuación de actualización de los parámetros implica restar el producto del gradiente por una tasa de aprendizaje, donde su función objetivo es:

$$f(x) = \sum (y_i - f(x_i))^2$$

y la actualización de parámetros es:  $x_{k+1} = x_k - \alpha \nabla f(x_k)$ , donde  $\alpha$  es la tasa de aprendizaje y  $\nabla f(x_k)$  es el gradiente de la función objetivo respecto a los parámetros.

#### 5.3.4.1.3. Método de Newton-Raphson

Es un método iterativo basado en el uso de la matriz Jacobiana y los residuos para realizar actualizaciones de los parámetros. La ecuación de actualización involucra el cálculo de la inversa de la matriz Jacobiana y la multiplicación por el vector de residuos, donde su función objetivo es:

$$f(x) = \sum (y_i - f(x_i))^2$$

y la actualización de parámetros:  $x_{k+1} = x_k - (J(x_k)^T J(x_k))^{-1} J(x_k)^T r(x_k)$ , donde  $J(x_k)$  es la matriz Jacobiana de las derivadas parciales de la función objetivo y  $r(x_k)$  es el vector de residuos.

#### 5.3.4.1.4. Método de Levenberg-Marquard

Es un algoritmo iterativo utilizado para ajustar modelos no lineales. Combina el método de Gauss-Newton y el método del gradiente para encontrar los parámetros óptimos. La ecuación de actualización de los parámetros combina el término de Gauss-Newton y un término de amortiguación controlado por un parámetro  $\lambda$ . la ecuación de actualización de los parámetros se expresa como (Press et al., 2007):

$$\Delta p = (J^T J + \lambda I)^{-1} J^T r$$

Donde  $\Delta p$  es el vector de actualización de los parámetros,  $J$  es la matriz Jacobiana que contiene las derivadas parciales de las funciones con respecto a los parámetros,  $\lambda$  es el parámetro de amortiguación que equilibra el método de Gauss-Newton y el método del gradiente, e  $r$  es el vector de residuos que representa la diferencia entre los valores observados y los valores predichos.

## 6. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

A continuación, se presenta un resumen gráfico del desarrollo de esta investigación en la Figura 1:

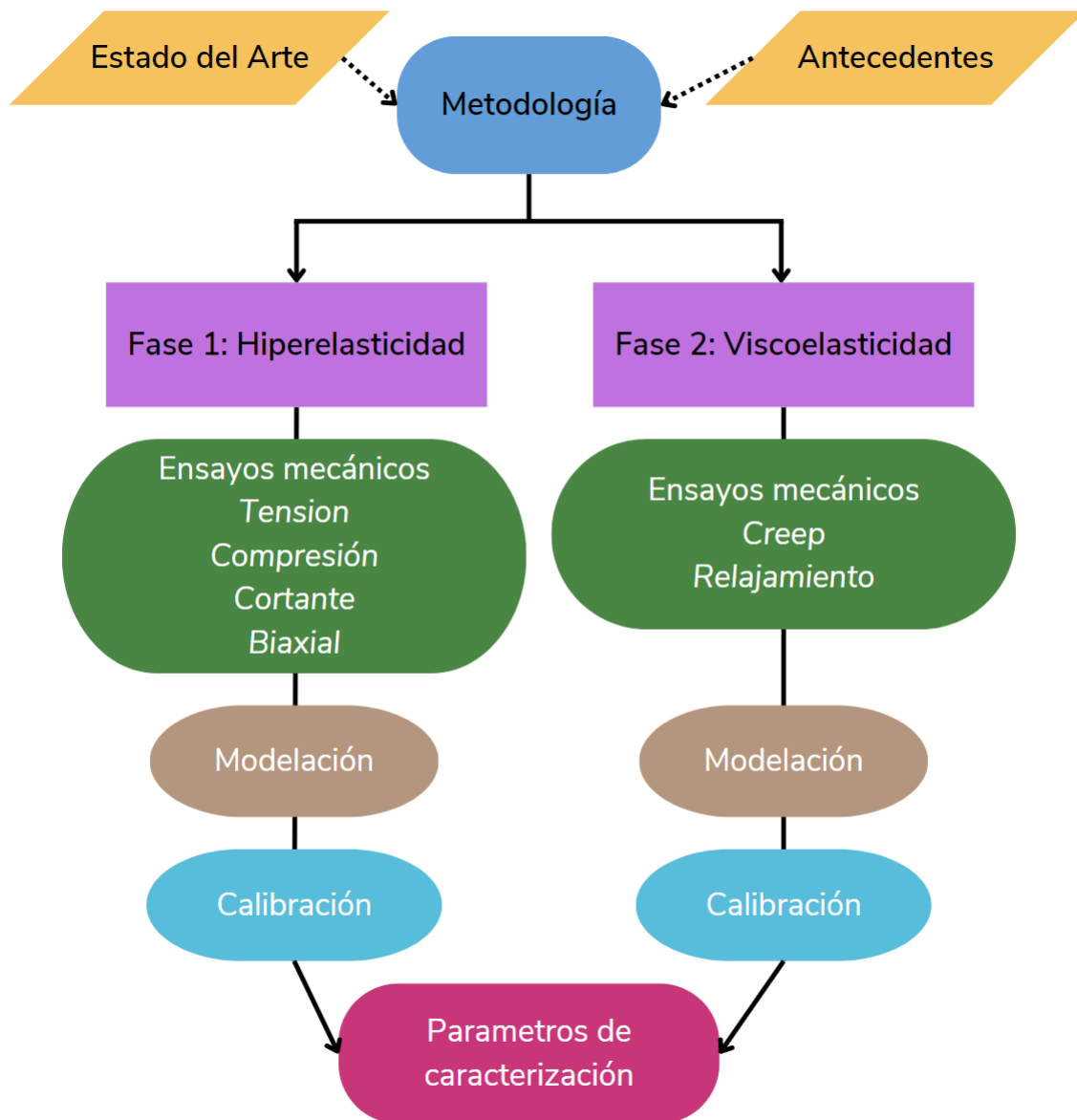


Figura 1. Resumen gráfico del trabajo presentado..

## 7. OBTENCIÓN DE LOS PARAMETROS DEL CAUCHO RECICLADO

### 7.1. Preparación del material

El material de la matriz de caucho reciclado se fabricó a partir de partículas de caucho granulado obtenidas a través de un proceso de reciclaje de varios pasos aplicado a neumáticos desechados descrito por Meza-Muñoz et al. y mostrado en la Figura 2. Esto implicó la eliminación de refuerzos, la trituración de los neumáticos en partículas de caucho granulado de diferentes tamaños, la preparación de una mezcla base de caucho granulado, la mezcla con un aglomerante de poliuretano, el moldeo de muestras de prueba y un tratamiento térmico.



Figura 2. Proceso de reciclaje de neumáticos de vehículos: (a) Selección de neumáticos y corte de flancos, (b) Corte de talón proceso, (c) léase cortado en tiras, (d) trituración inicial, (e) molienda y eliminación del acero restante, (f) Tamizado inicial y empaque, (g) tamizado mecánico y (h) Distribución del tamaño de partícula. (Meza-Muñoz et al., 2024)

Este proceso que da como resultado un material como se muestra en la Figura 3. en general transformó el caucho reciclado de los neumáticos en muestras de prueba para caracterizar las propiedades hiperelásticas y viscoelásticas necesarias para desarrollar aisladores sísmicos sostenibles con componentes de caucho reciclado (Meza-Muñoz et al., 2024). Los siguientes ensayos se realizaron con la intención de obtener las curvas mecánicas del material RR para diferentes modos de deformación y se compararon con los resultados de NR reportados por Muñoz (Muñoz Bermudez, 2017) y Luo et al. (Luo et al., 2016), para que el lector pueda crear una imagen de su utilidad.



*Figura 3. Material de caucho reciclado con aglomerante de poliuretano.*

## **7.2. Fase 1: Hiperelasticidad**

La primera parte de la metodología consiste en ensayos experimentales que permitan la obtención de las curvas esfuerzo deformación en diferentes modos para poder luego ajustar los parámetros hiper y viscos elásticos.

### **7.2.1. Ensayo de tensión uniaxial**

La norma ASTM D412 establece el método de prueba estándar para determinar las propiedades de tracción de materiales elastoméricos vulcanizados. Esta norma proporciona pautas y procedimientos para evaluar la resistencia a la tracción, la elongación y el módulo de elasticidad de los materiales de caucho.

El ensayo se realiza mediante la aplicación de una fuerza de tracción uniaxial a una muestra de caucho vulcanizado, hasta que se produce la ruptura de la muestra. Durante el

ensayo, se mide la tensión y la deformación de la muestra para obtener información sobre su comportamiento bajo carga.

La norma ASTM D412 especifica los detalles técnicos del ensayo, incluyendo los requisitos de las muestras, los equipos necesarios y los parámetros de prueba. Estos detalles incluyen la preparación de las muestras, que generalmente son en forma de probetas en diferentes dimensiones y formas según la aplicación específica. También se establecen los procedimientos para realizar la prueba, como la velocidad de carga, la medición de la tensión y la deformación, y la determinación de los valores de resistencia a la tracción, elongación y módulo de elasticidad.



*Figura 4. Forma de la probeta de tensión (ASTM D412).*

Donde las dimensiones de la probeta son  $A=25$  mm,  $L=33$  mm,  $W=6$  mm,  $C=115$  mm,  $G=14$  mm y  $H=25$  mm. Se fabricarán 5 probetas de este tipo.

#### **7.2.1.1. Desarrollo y resultados experimentales**

Las muestras se fijan de forma segura dentro de las abrazaderas de la máquina de ensayo Figura 5, con cada espécimen marcado de forma única para su identificación. Siguiendo los protocolos de la norma ASTM D412, las probetas se someten a ensayos de tracción utilizando una máquina universal de ensayos Instron 3366, en la Pontificia Universidad Javeriana de Cali (PUJC) en el Laboratorio de Suelos (SL-PUJC), hasta el punto de falla mecánica, manteniendo una tasa de extensión constante de 50 mm/min. La carga de resistencia se registró con precisión utilizando una célula de carga de 10 kN, mientras



que la deformación de las probetas se capturó con un extensómetro axial de clip de la SERIE 2630-100 de Instron. La Figura 6 Muestra la curva de tensión-deformación obtenida durante el ensayo. El material exhibió una respuesta hiperelástica, con una región lineal inicial pronunciada seguida de una transición gradual a una fase no lineal de ablandamiento de la deformación. La resistencia máxima a la tracción (UTS) fue de 1,62 MPa (7,2% CV) en promedio a una deformación de 0,47 que fue 1,2 veces más rígida que el caucho natural (NR) al mismo nivel de deformación probado por Muñoz [39] , lo que indica que, si bien el material es más rígido que el NR, aún se puede caracterizar como un material hiperelástico, lo que lo hace adecuado para aplicaciones de aislamiento.



*Figura 5. Montaje experimental de tensión (ASTM D412).*

El resultado de este ensayo proporciona información importante sobre las propiedades mecánicas del caucho, como su capacidad de resistir la tracción y deformarse antes de la ruptura. Estos datos son fundamentales para evaluar la idoneidad del material de caucho en aplicaciones donde se requiere resistencia a la tracción, como en aisladores sísmicos.

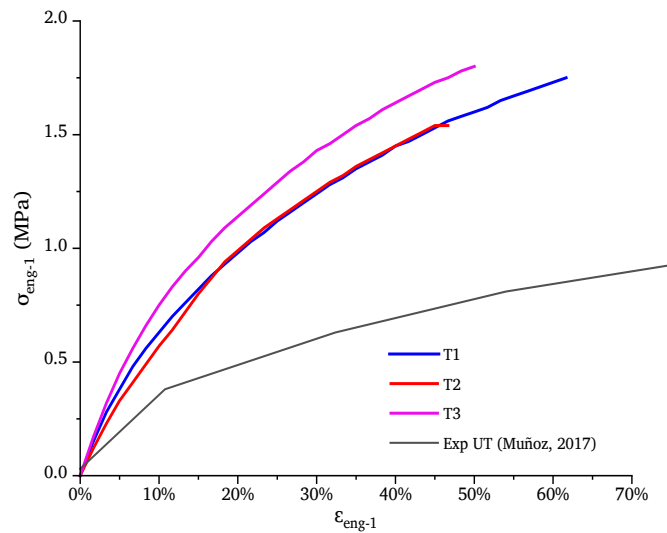


Figura 6. Curva de tensión uniaxial,  $\sigma_{eng-1}$  vs.  $\epsilon_{eng-1}$ .

### 7.2.2. Ensayo de compresión uniaxial

La norma ASTM D575-91 establece métodos de prueba estándar para evaluar las propiedades de compresión de materiales de caucho. Estos métodos permiten medir la respuesta del caucho cuando se somete a una carga de compresión uniaxial.

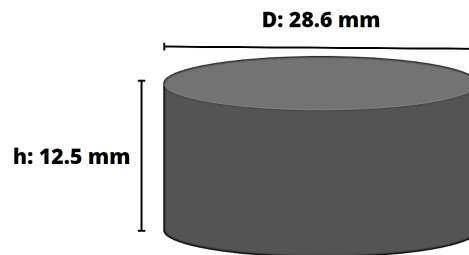
La norma especifica los procedimientos para llevar a cabo los ensayos de compresión y proporciona pautas sobre los equipos necesarios, las dimensiones de las muestras y las condiciones de ensayo.

Algunos de los métodos de prueba de compresión comúnmente utilizados según la norma ASTM D575-91 incluyen:

Método A: Ensayo de compresión no confinada: Este método se utiliza para evaluar las propiedades de compresión de muestras de caucho no confinadas. Se aplica una carga de compresión axial a una muestra y se mide la fuerza y la deformación resultantes. Este método proporciona información sobre el módulo de compresibilidad y la resistencia a la compresión.

Método B: Ensayo de compresión confinada: Este método se utiliza para evaluar las propiedades de compresión de muestras de caucho confinadas en una cavidad rígida. Se aplica una carga de compresión axial a la muestra y se mide la fuerza y la deformación resultantes. Este método permite determinar el módulo de compresibilidad y la resistencia a la compresión de muestras confinadas.

Para lo cual seguimos el Método A, realizando cinco probetas cilíndricas como se muestra en la Figura 7.



*Figura 7. Geometría de las probetas para compresión uniaxial (ASTM D575).*

#### **7.2.2.1. Desarrollo y resultados experimentales**

Las muestras se colocaron entre una placa y una celda de carga, cada una lubricada con una capa delgada de WD-40 para reducir la fricción Figura 9, y se someten a ensayos según la norma ASTM D575 a una velocidad constante de 12 mm/min. La deformación se monitorizó de forma continua utilizando el sistema de adquisición de datos Bluehill del Instron 3366 del SL-PUJC, con deformación calculada a partir de la posición y el desplazamiento de la placa. Antes de la prueba formal, las muestras se sometieron a dos ciclos de preacondicionamiento al 40% de deformación, seguidos de un ciclo final a la capacidad máxima de la máquina para capturar la gama más amplia posible de comportamiento del material. El estudio empleó una prueba de compresión uniaxial para evaluar las propiedades compresivas del material elastomérico. La curva de tensión-deformación resultante la Figura 8, ilustra la respuesta del material bajo compresión axial, comenzando con una fase lineal, que representa el comportamiento elástico inicial. Esta

fase lineal pasa a una región no lineal, lo que indica el inicio del endurecimiento por deformación, una característica comúnmente observada en los elastómeros bajo compresión. Se determinó que la resistencia a la compresión del material era de 13,54 MPa (11,9% CV), con una deformación correspondiente de 0,66. Sin embargo, estos valores se vieron limitados por la capacidad de la célula de carga, lo que desencadenó un apagado de seguridad, estos resultados exhiben la gran capacidad portante que proporciona este material, demostrando un comportamiento satisfactorio en aplicaciones de alta carga de compresión como el soporte de un edificio.

La norma ASTM D575-91 proporciona instrucciones detalladas sobre la preparación de las muestras, el montaje de los equipos de ensayo, la aplicación de la carga, la medición de la fuerza y la deformación, y el cálculo de los resultados.

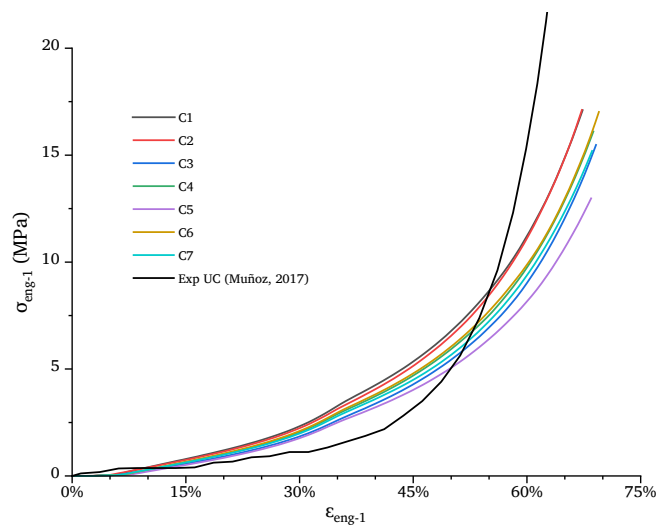


Figura 8. Curva de compresión uniaxial,  $\sigma_{eng-1}$  vs.  $\epsilon_{eng-1}$ .

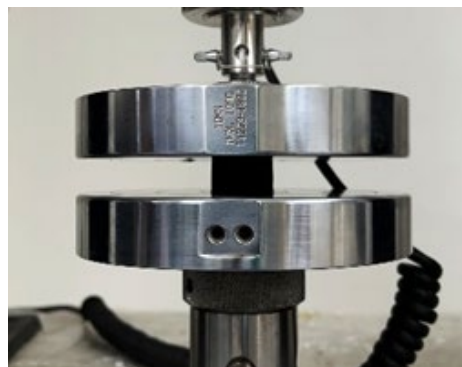
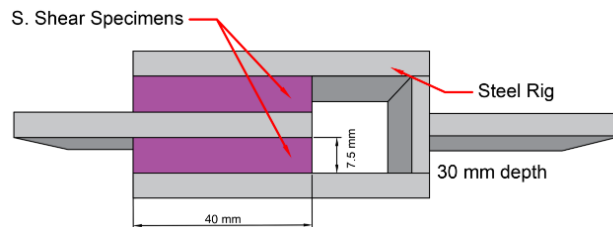


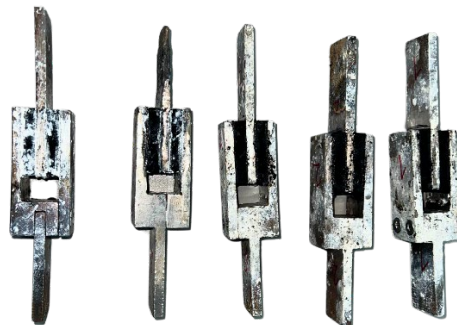
Figura 9. Montaje experimental de las probetas para compresión uniaxial (ASTM D575).

### 7.2.3. Ensayo de corte simple

Realizando una búsqueda de normativas aplicables, no se encuentra en la literatura una norma aplicable específica por lo que se sigue la metodología propuesta en libro *Physical Testing of Rubber* de (Brown, 2006).



*Figura 10. Geometría de la probeta de ensayo a corte simple.*



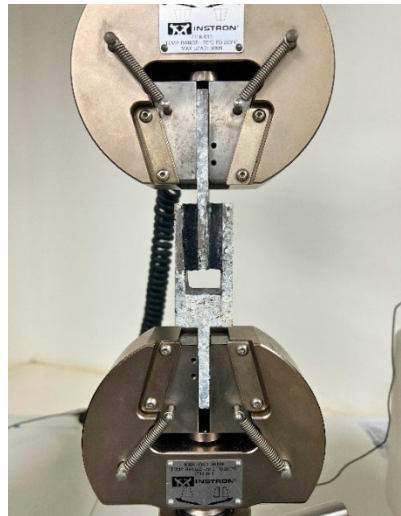
*Figura 11. Probetas de ensayo a corte simple.*

Donde se usará una dimensión de placa de caucho reciclado de 30mm de ancho por 40 mm de largo en el sentido de ensayo por 7.5 mm de alto, relación de esbeltez mayor o igual a 4.

#### 7.2.3.1. Desarrollo y resultados experimentales

Se utilizó el uso de ASTM D4014 e ISO 1827 para la prueba de corte o corte simple en muestras de elastómero de caucho reciclado. Con el fin de garantizar condiciones de contorno rígidas, se unieron dos muestras de caucho utilizando un epoxi de alto módulo. Con una extensión objetivo-mínima del 30% de deformación, las muestras se deformaron hasta que se produjo una falla del material, lo que proporcionó una evaluación completa

del comportamiento de corte del elastómero. Las pruebas se llevaron a cabo utilizando la máquina de pruebas universal SL-PUJC Instron 3366, con una tasa de extensión controlada de 5 mm/min, lo que garantiza condiciones de carga consistentes en todo (Figura 12). Esta metodología adaptada, si bien se basó en estándares establecidos, se adaptó específicamente para cumplir con los requisitos únicos de esta investigación, lo que mejoró la relevancia práctica de los resultados. La curva de esfuerzo cortante-deformación resultante (Figura 13) muestra una región lineal inicial, seguida de una fase no lineal indicativa de endurecimiento por deformación por corte, como se describe en (Brown, 2006). El material demostró un módulo de corte promedio de 1,92 MPa (13,7% CV). Esto refleja que, en comparación con el módulo de corte de 0,93 MPa de caucho natural (Muñoz Bermúdez, 2017) el material de caucho reciclado es más rígido a la deformación bajo fuerzas de corte, lo que indica que podría no ser tan eficaz en la amortiguación de las cargas sísmicas como el caucho natural, pero aun así puede diseñarse para disipar la energía requerida manteniendo costos más bajos (Losanno et al., 2022; Madera Sierra, Marulanda Casas, et al., 2019).



*Figura 12. Montaje de la probeta de ensayo a corte simple.*

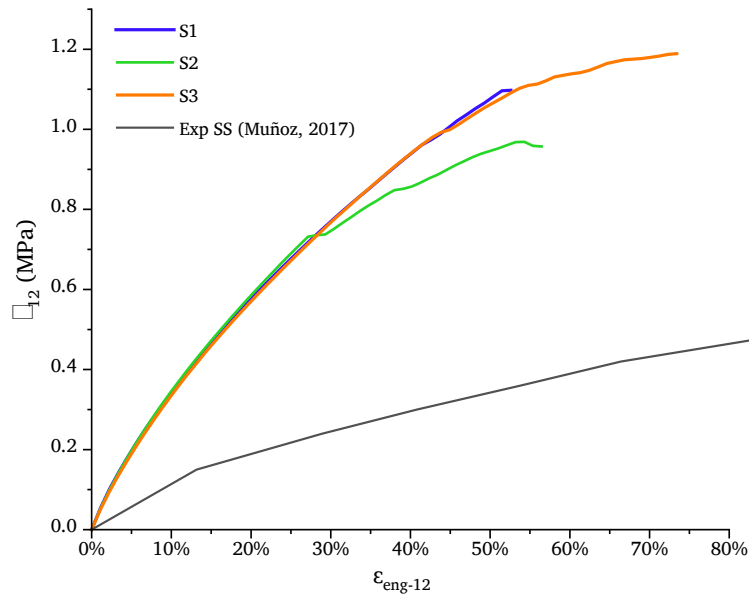


Figura 13. Resultados experimentales de la prueba de corte simple,  $\tau_{12}$  vs.  $\varepsilon_{eng-12}$ .

#### 7.2.4. Calibración de las características hiperelásticas del caucho reciclado

El proceso de calibración inversa implica típicamente los siguientes pasos:

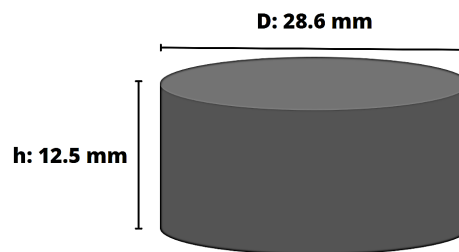
1. Selección del modelo constitutivo: Se elige un modelo constitutivo apropiado que describa el comportamiento del material en estudio. El modelo constitutivo puede ser una expresión matemática que relaciona el esfuerzo y la deformación, como en el caso de la elasticidad lineal o la hiperelasticidad.
2. Recopilación de datos experimentales: Se realizan pruebas o ensayos experimentales para obtener datos sobre el comportamiento del material bajo diferentes condiciones de carga. Estos datos pueden incluir resultados de pruebas mecánicas, mediciones de deformación, esfuerzos o cualquier otra propiedad relevante.
3. Definición de la función objetivo: Se establece una función objetivo que cuantifica la discrepancia entre los datos experimentales y las predicciones del modelo. Esta función objetivo puede ser una medida de ajuste, como el error cuadrático medio, que se busca minimizar durante el proceso de calibración.

4. Optimización: Se utiliza un algoritmo de optimización para encontrar los valores óptimos de los parámetros del modelo que minimizan la función objetivo. Los algoritmos de optimización pueden ser métodos iterativos que buscan ajustar los parámetros del modelo de manera gradual hasta encontrar la mejor solución.
5. Validación: Una vez que se han obtenido los valores óptimos de los parámetros del modelo, se valida el modelo calibrado utilizando datos adicionales o realizando pruebas de verificación para evaluar su capacidad para predecir el comportamiento del material en situaciones no utilizadas en la calibración.

### 7.3. Fase 2: Viscoelasticidad

#### 7.3.1. Ensayo de “Creep”

La norma ISO 8013, "Rubber, vulcanized - Determination of creep in compression or shear" (Caucho vulcanizado - Determinación de la fluencia en compresión o corte), establece un método para evaluar la fluencia de los cauchos vulcanizados cuando se someten a cargas constantes en compresión o corte. El ensayo de creep en compresión o corte es importante para comprender el comportamiento viscoelástico y la capacidad de deformación a largo plazo de los materiales de caucho utilizados en aplicaciones como aisladores sísmicos.



*Figura 14. Geometría de las probetas para creep.*

El ensayo se realiza aplicando una carga constante a una muestra de caucho vulcanizado (Figura 14) y midiendo la deformación que ocurre en el tiempo. Se especifican los requisitos para el equipo de ensayo, incluyendo las placas de compresión o corte, así



como las condiciones ambientales de temperatura y humedad durante el ensayo. La norma también establece el procedimiento para la preparación de las muestras y la medición de la deformación en intervalos de tiempo definidos.

El objetivo principal de la norma ISO 8013 es proporcionar una metodología estandarizada y confiable para determinar la resistencia del caucho vulcanizado a la fluencia en compresión o corte. Los resultados del ensayo ayudan a los fabricantes y diseñadores a seleccionar materiales de caucho adecuados para aplicaciones donde la deformación a largo plazo y la estabilidad dimensional son críticas, como en aisladores sísmicos utilizados en la construcción.

#### **7.3.1.1. Desarrollo y resultados experimentales**

El ensayo de fluencia se realizó siguiendo las normas ISO 8013 para evaluar el comportamiento de deformación a largo plazo del material. Se prepararon seis especímenes y se dividieron en dos grupos: tres se analizaron durante más de 30 días y los tres restantes durante 15 días, lo que permitió evaluar las características de fluencia durante diferentes períodos. Se aplicó una carga inicial que inducía una deformación del 20% utilizando una máquina de consolidación de suelos modificada (Figura 15), garantizando un control preciso. Un Transformador Diferencial Variable Lineal (LVDT) monitoreó y registró continuamente la deformación de las muestras. Los resultados, que abarcan 48.784 minutos (33,9 días), se presentan en la Figura 16, que ofrece información clave sobre el rendimiento del material bajo carga continua, particularmente relevante para aplicaciones de aislamiento sísmico. La curva de fluencia ilustra la deformación dependiente del tiempo del material bajo carga constante. Inicialmente, la curva destaca la rápida deformación que se produce tras la aplicación de la carga, una respuesta característica de los elastómeros similares al caucho, lo que indica la capacidad del material para adaptarse rápidamente a los cambios de carga, una propiedad valiosa para aplicaciones dinámicas (J. Bergström, 2015). En la siguiente fase de fluencia en estado estacionario, el material sufre una deformación sostenida pero más lenta, lo que refleja su capacidad para mantener la integridad estructural a lo largo del tiempo. Esta estabilidad a

largo plazo es particularmente importante en aplicaciones de ingeniería como el aislamiento de bases (Naeim & Kelly, 1999). Se encontró que la tasa de fluencia promedio del material fue de 0,0027 mm/h (8,0% CV), 2,3 veces mayor que la NR 0,0012 mm/h (Muñoz Bermudez, 2017), esto puede deberse a que los espacios intersticiales en el RRM quedan desocupados por la geometría del aglomerante o del caucho granulado.

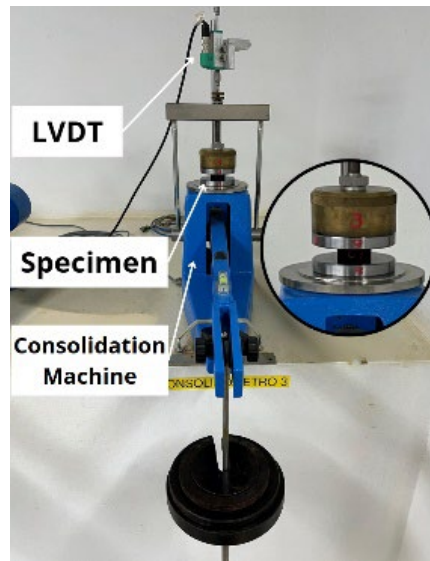


Figura 15. Montaje de las probetas para creep.

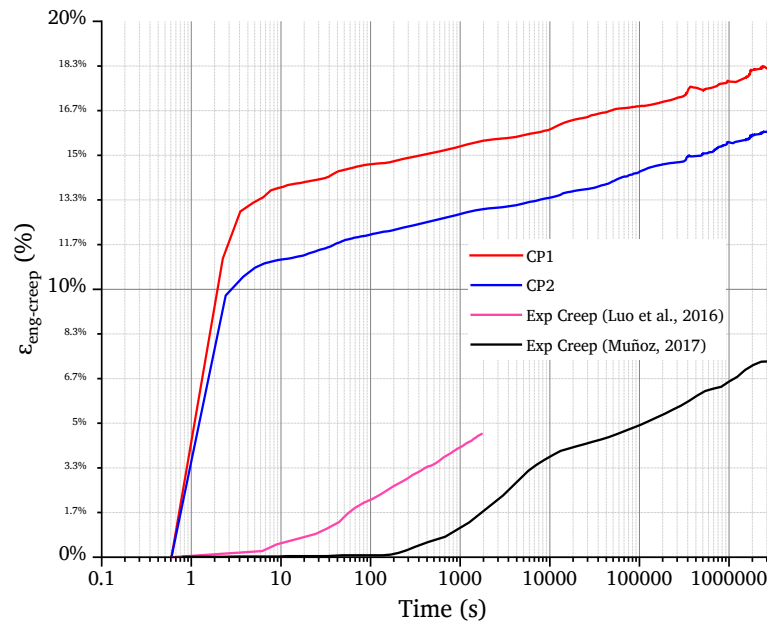
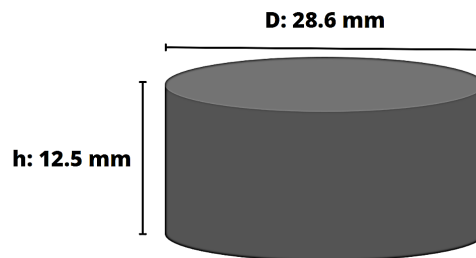


Figura 16. Resultados experimentales de la prueba de creep,  $\epsilon_{12}$  vs. tiempo.

### 7.3.2. Ensayo de relajación (Relaxation)

La norma ASTM D6147 se utiliza para determinar la propiedad de relajamiento en cauchos vulcanizados, que es relevante en el contexto de aisladores sísmicos. Proporciona un procedimiento para evaluar la capacidad de un caucho vulcanizado para retener la fuerza aplicada después de un período de tiempo. El ensayo de relajamiento según la norma ASTM D6147-97 se realiza aplicando una carga de compresión constante a una muestra de caucho y midiendo la disminución de la fuerza a lo largo del tiempo. El objetivo es evaluar la capacidad del caucho para resistir el relajamiento o la pérdida de fuerza a largo plazo bajo cargas sostenidas. Esto es especialmente importante en el caso de los aisladores sísmicos, donde se requiere una resistencia constante a lo largo del tiempo para garantizar su funcionamiento efectivo para lograr este ensayo se prepararon probetas de caucho reciclado con la geometría ilustrada en la Figura 17.



*Figura 17. Geometría de las probetas para relajamiento.*

#### 7.3.2.1. Desarrollo y resultados experimentales

La prueba de relajación se realizó de acuerdo con la norma ASTM D6147 para evaluar las características de relajación de la tensión a largo plazo del material. Tres especímenes se comprimieron al 25% de su altura original y se probaron durante más de 7 días. La máquina de consolidación de suelos modificada de la SL-PUJC (Higo. 9) proporcionó una compresión controlada, mientras que un deflectómetro LVDT midió y registró continuamente las reacciones de fuerza a lo largo de la duración. En él se exploró la respuesta dependiente del tiempo del material bajo una tensión sostenida. Los resultados, que se muestran en Higo. 10, demuestra la capacidad del RRM para mantener la carga

durante períodos prolongados sin pérdidas significativas del orden de 0,012 MPa/h (2,2% CV), particularmente útil para aplicaciones que requieren durabilidad y capacidad de carga a lo largo del tiempo, en relación con los 4,09 MPa/h de NR . Esto indica que el RRM pierde capacidad portante mucho más lentamente que la matriz NR (NRM). Esta relajación gradual es importante para aplicaciones que exigen un rendimiento prolongado del material, como el aislamiento de la base.[38]



Figura 18. Montaje de las probetas para relajamiento.

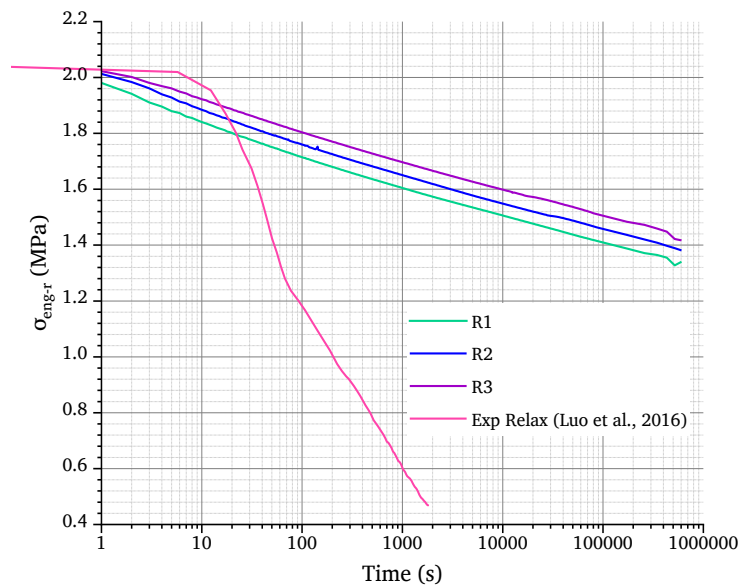


Figura 19. Resultados experimentales de la prueba de relajación,  $\sigma_{eng-r}$  vs. tiempo.

### 7.3.3. Calibración de parámetros viscoelásticos

En primer lugar, se debe seleccionar un modelo viscoelástico apropiado que represente el comportamiento del material bajo estudio, como el modelo de Kelvin-Voigt, el modelo de Maxwell o el modelo de Jeffreys.

A continuación, se lleva a cabo la recopilación de datos experimentales a través de ensayos de creep y relajación. En el ensayo de creep, se aplica una carga constante y se mide la deformación a lo largo del tiempo. Por otro lado, en el ensayo de relajación, se aplica una deformación constante y se mide la carga a lo largo del tiempo. Estos datos experimentales proporcionan información crucial sobre el comportamiento viscoelástico del material.

Una vez que se disponen de los datos experimentales, se establecen valores iniciales para los parámetros del modelo viscoelástico. Estos valores iniciales pueden basarse en conocimientos previos o en estimaciones razonables. Utilizando los parámetros iniciales y el modelo viscoelástico seleccionado, se realiza la simulación del comportamiento del material y se obtienen predicciones teóricas de deformación o carga a lo largo del tiempo.

El siguiente paso implica la comparación de las predicciones del modelo con los datos experimentales obtenidos en los ensayos de creep y relajación. Se calcula una medida de discrepancia, como el error cuadrático  $R^2$  para evaluar qué tan bien se ajustan las predicciones a los datos reales.

Para lograr un mejor ajuste, se utiliza un algoritmo de optimización que permita ajustar los parámetros del modelo viscoelástico y minimizar la discrepancia entre las predicciones del modelo y los datos experimentales. Métodos como el de mínimos cuadrados o el método de Levenberg-Marquardt son comúnmente utilizados en esta etapa.

Por último, se evalúan los parámetros optimizados y se realizan ajustes adicionales si es necesario. Se repiten los pasos 4 a 7 hasta que las predicciones del modelo se ajusten de manera satisfactoria a los datos experimentales.

## 8. CALIBRACIÓN Y RESULTADOS DE LOS PARAMETROS DE LA MATRIZ DE CAUCHO RECICLADO

El proceso de calibración de todos los experimentos se realizó ajustando los datos simultáneamente para garantizar la consistencia y evitar la segmentación del análisis utilizando el software MCalibration (PolymerFEM, 2023) (Figura 20). A continuación, se trazaron estas mediciones, comparando los resultados experimentales con varios modelos hiperelásticos y viscoelásticos, y los coeficientes de cada modelo se muestran en la Tabla 1. Los gráficos de tensión, compresión, corte, fluencia y relajación se muestran juntos en las Figura 21, Figura 22, Figura 23, Figura 24 y la Figura 25. En la prueba de tensión uniaxial, el modelo de Bergstrom-Boyce (BB) demostró un ajuste superior, siguiendo de cerca los datos experimentales hasta un 50% de deformación con un error mínimo (aproximadamente  $\pm 2\%$ ), mientras que otros modelos como Ogden (OG), Mooney-Rivlin (MR), Arruda-Boyce (AB) y Neo-Hookean (NH) se desviaron a deformaciones más altas, tendiendo a sobreestimar la rigidez más allá del umbral de deformación del 30%. La precisión en tensión del modelo BB probablemente se deba a su capacidad para tener en cuenta el endurecimiento por deformación de manera más efectiva, a diferencia de los otros modelos, que predijeron un comportamiento más lineal durante las primeras etapas de la deformación (J. Bergström, 2015).

Para la prueba de compresión, el modelo de Yeoh proporcionó la alineación más cercana con los datos experimentales, manteniendo predicciones precisas, particularmente para deformaciones superiores al 50%, lo que coincide con los hallazgos de otras investigaciones (Yeoh, 1993). Por el contrario, los modelos NH y OG comenzaron a divergir a mayores deformaciones compresivas, subestimando la rigidez del material más allá de este punto. El rendimiento preciso del modelo Yeoh sugiere que es adecuado para simular el comportamiento de compresión de materiales similares al caucho bajo carga. En las pruebas de corte, el modelo BB volvió a superar a los demás al capturar tanto la rigidez inicial como la respuesta a la tensión bajo alta tensión, prediciendo una tensión máxima de 1,12 MPa. Comparativamente, los modelos neo-Hookean y Mooney-Rivlin subestimaron la

rigidez del material a deformaciones más bajas, pero proporcionaron aproximaciones más precisas a niveles más altos de deformación. La capacidad del modelo BB para predecir el comportamiento del corte bajo grandes deformaciones lo hace ideal para simular el comportamiento del material específico del corte (J. Bergström, 2015; Rivling, 1948).

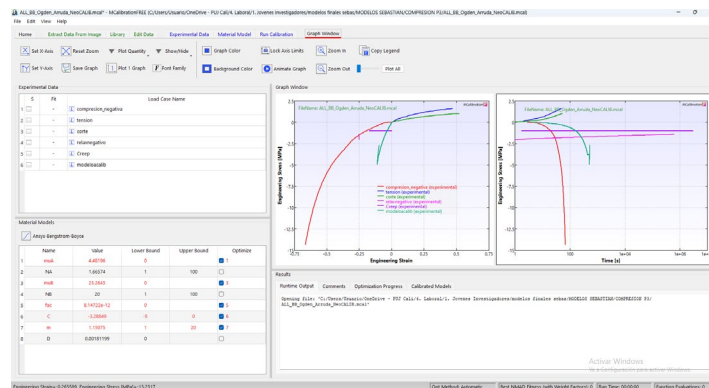


Figura 20. Imagen de la calibración simultánea en MCalibration.

En la prueba de fluencia, los modelos de Arruda-Boyce (AB) y Ogden proporcionaron las predicciones más precisas, con tasas de deformación de 0,0028 mm/h ambos, respectivamente, coincidiendo estrechamente con los datos experimentales. Estos modelos fueron particularmente exitosos en capturar el comportamiento viscoelástico a largo plazo del material, mientras que otros modelos como Neo-Hookean y Mooney-Rivlin sobreestimaron la deformación, lo que los hizo menos adecuados para predicciones precisas a largo plazo (Arruda & Boyce, 1993; Boyce & Arruda, 2000), sin embargo, el modelo BB se mantuvo dentro del rango experimental mientras proporcionaba valores aceptables. En la prueba de relajación, el modelo BB predijo una pérdida de esfuerzo del 29,4%, alineándose estrechamente con la reducción de esfuerzo del 31,2% observada experimentalmente. Este modelo demostró efectividad en la predicción del comportamiento de relajación del esfuerzo a lo largo del tiempo, mientras que el modelo de Mooney-Rivlin subestimó la pérdida de esfuerzo, lo que sugiere limitaciones en la captura de los efectos viscoelásticos.

Tabla 1. Parámetros del material de caucho reciclado calibrados.

Model	Hyperelasticity Parameters						Viscoelasticity Parameters					
Ogden 2nd	$\mu_1$	$\alpha_1$	$\mu_2$	$\alpha_2$	$D_1$	$D_2$	$t_{mean}$	$t_{std}$	B	Np	$\Sigma g$	
	1.974	1.804	2.112	1.735	0.022	0	0.143	71.66	0.575	10	0.594	
Error (R2)	UC	96%	UT	97%	SS	75%	R	91%	CP	0%	AVG	72%
Mooney Rivlin term	$C_{10}$	$C_{01}$	D				$t_{mean}$	$t_{std}$	B	Np	$\Sigma g$	
	1.376	-0.124	0.379				1.157	9.59	0.083	10	0.331	
Error (R2)	UC	98%	UT	94%	SS	85%	R	87%	CP	0%	AVG	73%
Neo Hookean	$\mu$	D					$t_{mean}$	$t_{std}$	B	Np	$\Sigma g$	
	3.004	0.332					2.724	22.984	0.451	10	0.467	
Error (R2)	UC	99%	UT	97%	SS	87%	R	94%	CP	0%	AVG	75%
Arruda Boyce	$\mu$	$\lambda_L$	D				$t_{mean}$	$t_{std}$	B	Np	$\Sigma g$	
	2.967	10	0.656				5.532	42.311	-0.492	10	0.418	
Error (R2)	UC	98%	UT	96%	SS	92%	R	96%	CP	0%	AVG	76%
Bergstrom Boyce	$\mu_A$	$N_A$	$\mu_B$	$N_B$	D		fac	C	m			
	1.03	4.619	4.546	0.82	0.197		1.142	-1.682	12.62			
Error (R2)	UC	97%	UT	92%	SS	97%	R	91%	CP	81%	AVG	92%

Los modelos neo-hookeano y arruda-boyce mostraron pérdidas de esfuerzo de 25,5% y 21,6% respectivamente, siguiendo patrones de comportamiento similares a los observados en estudios previos (J. Bergström, 2015; Ogden, 1972; Ogden et al., 2004). El modelo de Ogden, con una pérdida de tensión prevista del 26,5%, sobreestimó un poco la resistencia del material a la relajación de la tensión, al tiempo que captó el comportamiento elástico no lineal. El modelo BB mostró una buena precisión en múltiples pruebas. Su rendimiento en tensión, corte y relajación, junto con su comportamiento en el análisis de fluencia, reflejó características comparables a las reportadas por otros investigadores para materiales similares (J. Bergström, 2015; J. S. Bergström & Boyce, 2000; Findley et al., 1989). Teniendo en cuenta estos resultados y su métrica de error  $R^2$  de 0,92 como se muestra en la Tabla 1, se seleccionó el modelo BB para la fase de modelado del prototipo.



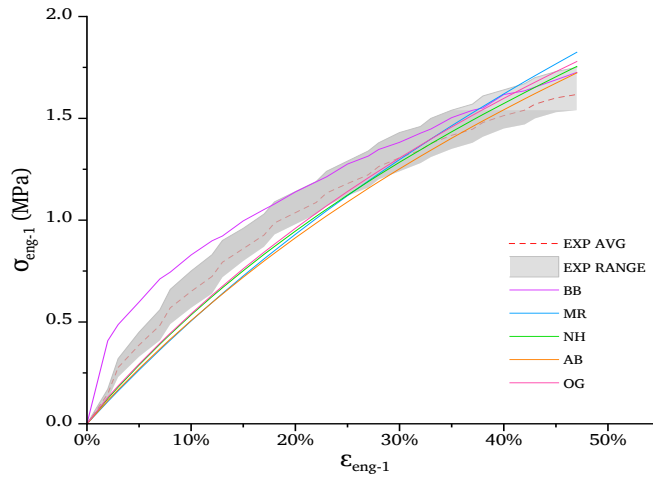


Figura 21. Curvas calibradas: Tensión (UT).

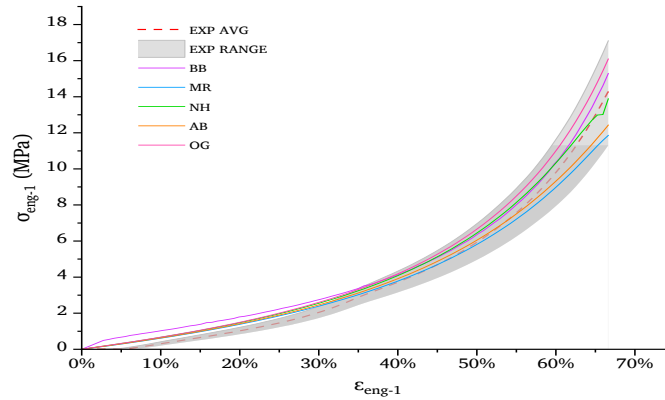


Figura 22. Curvas calibradas: Compresión (UC).

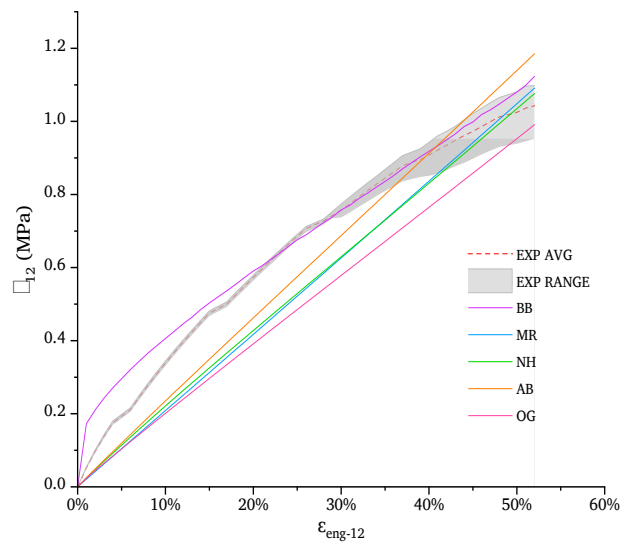


Figura 23. Curvas calibradas: Corte Simple (SS)

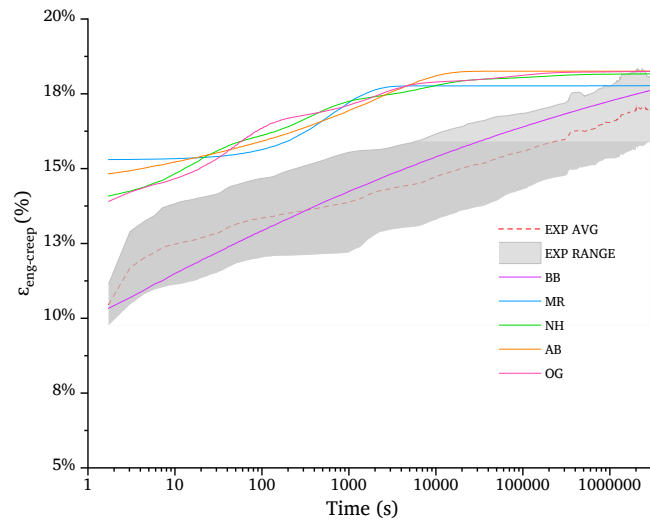


Figura 24. Curvas calibradas: Fluencia (CP)

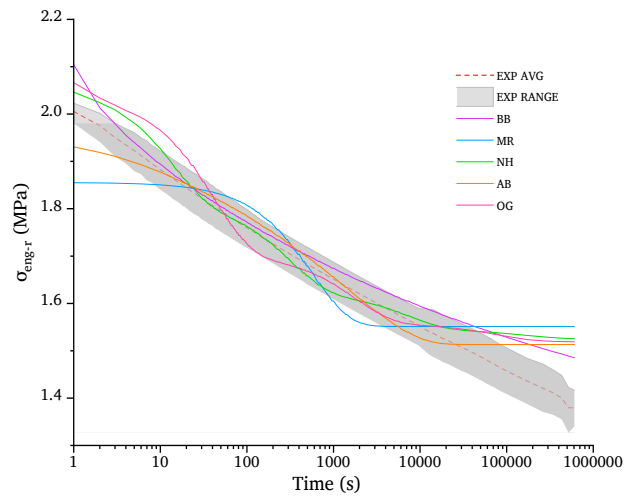


Figura 25. Curvas calibradas: Relajación (R).

## 9. OBTENCIÓN Y VALIDACIÓN DE LOS PARÁMETROS DEL PROTOTIPO

Para validar los parámetros del material obtenidos en este estudio, se desarrollaron modelos de análisis de elementos finitos (FEA) para simular ensayos experimentales de compresión cíclica y corte previamente realizados por Lemos et al. (Lemos-Micolta et al., 2024) y Velasco (Velasco-Cuervo, 2024), respectivamente. En estos experimentos se utilizaron prototipos de RRM que incorporaban refuerzo textil de poliéster, una configuración que ha sido ampliamente estudiada (Losanno et al., 2020; Ortega, 2022; Ortega et al., 2023b). Los especímenes de prueba siguieron un diseño estandarizado desarrollado por Madera-Sierra (Madera Sierra, 2018; Madera Sierra, Losanno, et al., 2019; Madera Sierra, Marulanda Casas, et al., 2019), utilizando la composición RRM establecida por Ortega (Ortega et al., 2023b). Cada prototipo consistió en capas alternas de material RRM mezclado con adhesivo de poliuretano y refuerzo textil de poliéster: 15 capas de RRM ( $T_r = 1$  mm de espesor) alternadas con 14 capas de refuerzo de poliéster ( $T_f = 2$  mm de espesor), dando como resultado una estructura compuesta con una altura total de  $HT = 44$  mm, un diámetro exterior de 80 mm y una cubierta de 5 mm. Las simulaciones numéricas emplearon el modelo BB, lo que permitió la comparación directa entre los resultados de FEA y los datos experimentales para validar los parámetros finales del material.

### 9.1. Modelos de elementos finitos (FEM)

El FEA se llevó a cabo en ANSYS (ANSYS Inc.), donde el caucho se modeló como un solo elemento (cilindro) con un diámetro de 75 mm (MS) y 44 mm de altura con 15 capas de RRM con un espesor de 2 mm y 14 capas de refuerzo textil de poliéster (Losanno et al., 2020; Ortega, 2022; Ortega et al., 2023b) con un espesor de 1 mm como se muestra en la Figura 26, la fibra como superficie intermedia (midsurface), y las placas de acero como elementos sólidos. Se definieron elementos de contacto superficie-superficie con un coeficiente de fricción de 0,6 entre las placas de caucho y acero para simular su interacción con precisión.

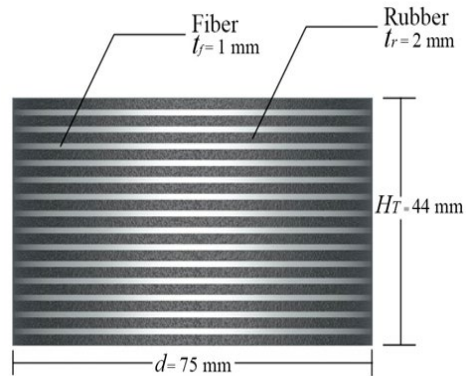


Figura 26. Geometría FEA de las probetas para calibraciones de compresión cíclica y corte (Muñoz-Gutierrez et al., 2024).

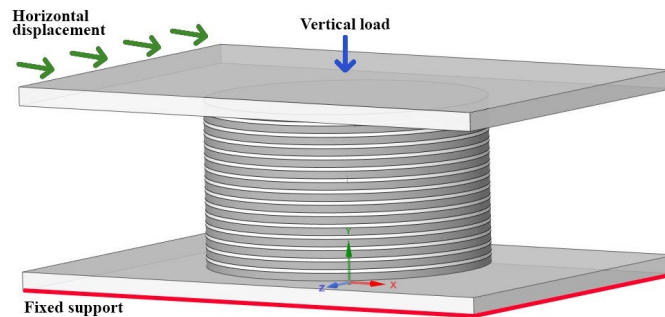


Figura 27. Esquema de la carga del modelo FEA para calibraciones de compresión cíclica y corte (Muñoz-Gutierrez et al., 2024).

El mallado utilizó una malla mecánica no lineal con un orden de elementos lineal y un tamaño de elemento especificado, asegurando un total de 6963 nodos y 5208 elementos (Muñoz-Gutiérrez et al., 2024). En ambas simulaciones se utilizó el mismo modelo. Para la prueba de compresión, se aplicó un desplazamiento remoto de punto vertical en el centro de la placa de acero superior y se cargó de acuerdo con el protocolo (Figura 27), todo en un solo paso. En la prueba de corte, la carga puntual vertical se reemplazó con una fuerza constante de 19 kN aplicada a distancia, junto con un desplazamiento remoto horizontal adicional en el lado de la placa de acero superior, siguiendo los protocolos (Figura 28, Figura 31) (Muñoz-Gutiérrez et al., 2024).

## 9.2. Calibración

La calibración consistió en el uso de los softwares MCalibration (PolyUMod) y ANSYS (ANSYS Inc.) al mismo tiempo que se realizó el ajuste fino de los coeficientes del material de caucho en base a los datos experimentales. Este proceso se logró vinculando MCalibration a un script de entrada de ANSYS. Esta calibración tuvo como objetivo lograr un alto nivel de confianza en la capacidad del modelo para predecir la rigidez efectiva y las propiedades de amortiguación por debajo del 20% de errores en la rigidez efectiva ( $K_{eff}$ ) y la relación de amortiguación viscosa ( $\beta$ ), respectivamente. Inicialmente, los coeficientes para el modelo BB fueron los que se muestran en la Tabla 1. Luego, se sometieron a 50 calibraciones de algoritmos aleatorios y una optimización NEWUOA (Powell, 2004) con un radio de región de confianza inicial y final de 5 y 1E-6 respectivamente. La rigidez efectiva se evaluó mediante (Eq 7.). (Cilento et al., 2022) donde  $U$ , representa la amplitud máxima y mínima de los desplazamientos laterales impuestos al prototipo, y  $F_{max}$  y  $F_{min}$  son, respectivamente, las fuerzas cortantes máximas y mínimas correspondientes experimentadas por el aislador durante el ciclo de carga de interés.

$$K_{eff} = \frac{F_{max} - F_{min}}{U_{max} - U_{min}} \quad (Eq 7.)$$

En la (Eq. 8.) (Saremi & Toopchi-Nezhad, 2021) la relación de amortiguamiento viscoso equivalente  $\beta$  del aislador en cada ciclo de prueba se puede evaluar en función de la energía disipada (el área encerrada en el ciclo de histéresis) y la energía almacenada, como se muestra en la Eq. 9. (Saremi & Toopchi-Nezhad, 2021).

$$\beta = \frac{W_d}{4\pi W_s} \quad (Eq 8.)$$

$$W_s = \frac{K_{eff} \Delta_{max}}{2} \quad (Eq 9.)$$

El análisis de los coeficientes de Bergström-Boyce obtenidos a través del proceso de calibración (Tabla 2) reveló desviaciones significativas de los parámetros iniciales obtenidos en la caracterización de la matriz no reforzada con claras diferencias entre los parámetros verticales (compresión) y horizontales (corte). Esta variación integral en ambas direcciones sugiere una influencia sustancial del refuerzo textil en el comportamiento mecánico general del prototipo. Los parámetros verticales mostraron marcadas diferencias debido al efecto de confinamiento de las capas de refuerzo sobre la matriz de caucho, mientras que los parámetros horizontales también se desviaron significativamente, lo que indica que la influencia del refuerzo textil se extiende más allá del mero confinamiento vertical. Estos hallazgos amplían investigaciones previas sobre aisladores elastoméricos reforzados con fibra [4, 9, 10, 57, 65], destacando que el modelado numérico preciso de estos aisladores compuestos requiere considerar la compleja interacción tridimensional del refuerzo con la matriz de caucho, en lugar de tratarlo como un simple mecanismo de confinamiento vertical.

Las curvas etiquetadas como "EXP" representan los datos experimentales obtenidos de las pruebas físicas. "FEM" denota simulaciones numéricas que utilizan múltiples conjuntos de coeficientes calibrados para diferentes intervalos de deformación, mientras que "FEM-1" muestra los resultados de las simulaciones que utilizan un solo conjunto de coeficientes en todos los rangos de deformación.

### **9.3. Compresión cíclica (CC)**

El ensayo de compresión cíclica se realizó en el Laboratorio de Estructuras de la PUJC (Figura 29). El ensayo implicó una carga monotónica de hasta 19 kN a una velocidad de 0,01 mm/s, que representa la carga de diseño P. A esto le siguieron 3 ciclos consecutivos con una variación del  $\pm 30\%$  en la carga de diseño. Finalmente, la descarga monótona ocurrió a la misma velocidad que se muestra en la Figura 28. (Losanno et al., 2019).

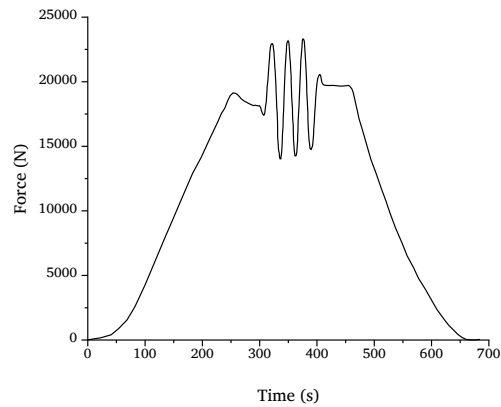


Figura 28. Protocolo de compresión cíclica (Lemos-Micolta et al., 2024).

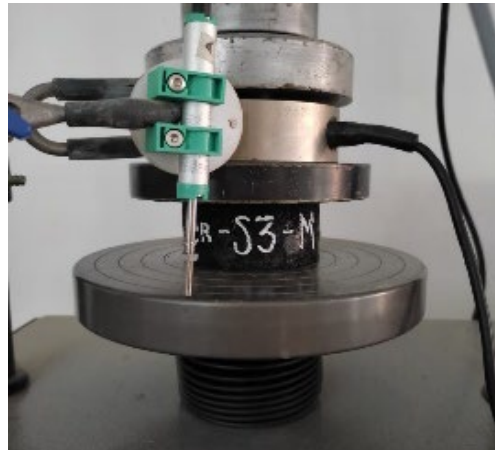


Figura 29. Montaje experimental de compresión cíclica (Lemos-Micolta et al., 2024).

### 9.3.1. Calibración y resultados de la Compresión cíclica (CC)

La simulación predijo una rigidez vertical ligeramente menor,  $K_v$  de 14,3 kN/mm, lo que refleja un error de aproximadamente el 10,5%. Este valor resulta aceptable teniendo en cuenta que el modelo no solo representa el comportamiento del RRM, sino también la influencia del refuerzo. En términos de fuerza máxima, el valor experimental alcanzó los 24,6 kN, en comparación con la fuerza máxima simulada de 23,6 kN, lo que resultó en una diferencia relativamente pequeña del 4,3%. Esto indica que la simulación puede predecir razonablemente la resistencia del material en condiciones de carga máxima. Además, los desplazamientos máximos fueron casi idénticos, con los datos experimentales mostrando 5,02 mm y el resultado de la simulación en 4,97 mm, una diferencia insignificante de

alrededor del 1,0%. Esto sugiere que el modelo particionado captura mejor el comportamiento de la deformación bajo cargas máximas en comparación con el uso de un solo conjunto de coeficientes para toda la simulación, como se muestra en la Tabla 2 y la Figura 30, lo que proporciona confianza en su capacidad para replicar el rendimiento en el mundo real. Esto demuestra que el modelo es eficaz para replicar la respuesta elástica del material bajo cargas verticales, aunque un mayor ajuste de los parámetros podría mejorar la precisión predictiva.

Tabla 2. Parámetros de material calibrados para compresión cíclica.

<b>BB Coeff.</b>	<b>SCC</b>	<b>CC</b>
$\mu_0$ [MPa]	1.4	5.5
$N_0$	30.3	55.0
$\mu_1$ [MPa]	60.0	30.0
$N_1$	30.3	30.0
Fac	1.4	1.4
C	-1.9	-1.2
m	12.0	19.2
D [MPa <sup>-1</sup> ]	0.1	0.1

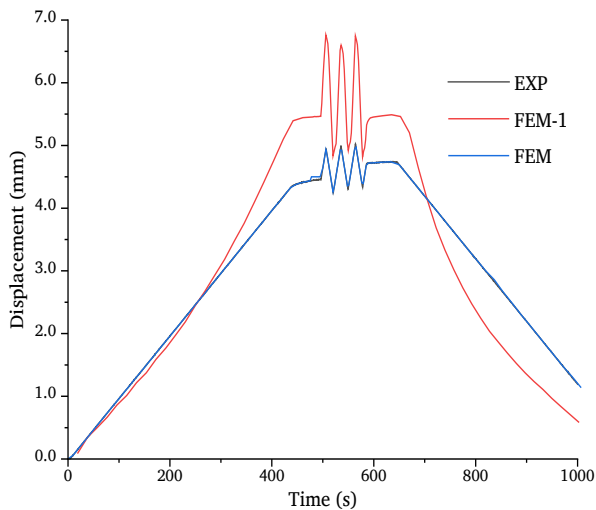
Tabla 3. Valores de comparación de  $K_v$  entre datos experimentales y calibrados.

	$K_v$ [kN/mm]			$K_{v_{avg}}$
	<b>Cycle 1</b>	<b>Cycle 2</b>	<b>Cycle 3</b>	<b>[kN/mm]</b>
EXP	15.9	16.0	16.1	16.0
FEM-1	5.6 (-64.8%)	6.0 (-62.5%)	5.9 (-63.4%)	5.8 (-63.5%)

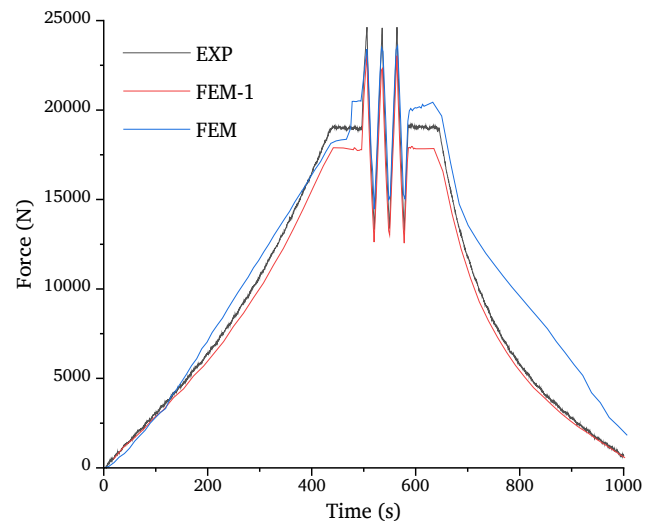


FEM                      13.3 (-16.3%)                      14.9 (-6.7%)                      14.7 (-8.4%)                      14.3 (-10.5%)

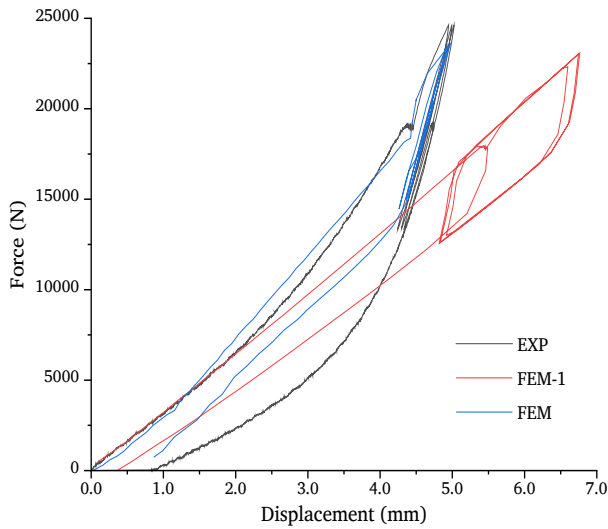
Al analizar los coeficientes desde el inicio de la prueba de compresión (SCC) y la fase de compresión cíclica, los cambios en  $\mu_0$  indican un aumento en la capacidad de corte debido a la deformación inicial. La matriz del material, compuesta por migas de caucho adheridas, no es monolítica y se asemeja a una estructura similar al suelo con vacíos. A medida que avanza la deformación, la relación de vacíos disminuye, compactando la matriz y dando como resultado el aumento observado en la capacidad de corte. Además, el coeficiente  $N_0$ , que representa el tramo límite, está influenciado por la deformación inicial [65], [66], [67]. Esto puede deberse a la reorganización de las partículas dentro del material, lo que permite una mayor capacidad de deformación a medida que la estructura se ajusta a la carga aplicada. Al considerar el factor viscoelástico, no hay diferencia significativa entre la carga inicial y la fase de prueba cíclica, ya que el comportamiento viscoelástico se manifiesta principalmente a largo plazo, mientras que este protocolo cubre una duración corta. Además, el coeficiente volumétrico (D) sugiere que el material se comporta como casi incompresible, lo que apoya la validez de utilizar este modelo junto con otros modelos hiperelásticos y viscoelásticos.



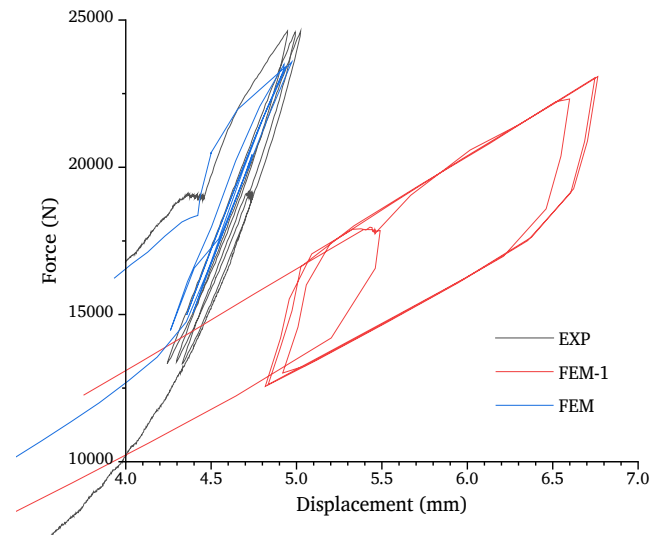
(a)



(b)



(c)



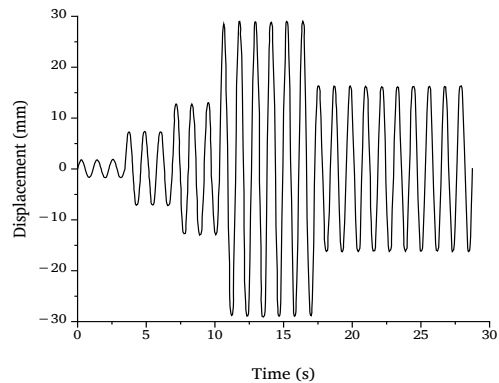
(d)

Figura 30. Resultados de la compresión cíclica: (a) tiempo-desplazamiento, (b) tiempo-fuerza, (c) fuerza-desplazamiento y (d) fuerza-desplazamiento ampliada.

#### 9.4. Ensayo de corte cíclico (CS)

La prueba de corte cíclico se llevó a cabo en el Laboratorio de Sistemas de Infraestructura Inteligente de la Universidad de Purdue en los EE. UU (Figura 32). Las probetas se ensayaron con carga combinada de corte y compresión. Se aplicó una presión vertical constante  $P = 19 \text{ kN}$  sobre la placa de acero superior. Simultáneamente, se impusieron desplazamientos laterales sinusoidales con un período de diseño  $TD = 1.15 \text{ s}$  y un desplazamiento máximo  $MS = 29 \text{ mm}$  (Losanno et al., 2019).

La amplitud de desplazamiento se varió en tres etapas: (i) tres ciclos cada uno a  $0.25DM$ ,  $0.50DM$ ,  $0.67DM$ ,  $1.00DM$ , (ii) tres ciclos a  $1.00DM$  completo, y (iii) diez ciclos continuos a  $0.75DM$  (Figura 31) (Losanno et al., 2019). En el modelo FEM, la carga vertical constante y los desplazamientos sinusoidales se introdujeron en la placa de acero superior. La evaluación comparativa de las curvas experimentales y simuladas de esfuerzo cortante cíclico y deformación proporcionó una mayor validación de los modelos de materiales.



*Figura 31. Protocolo de corte cíclico (Velasco-Cuervo, 2024).*



*Figura 32. Montaje experimental de corte cíclico (Velasco-Cuervo, 2024).*

#### **9.4.1. Calibración y resultados del Corte Cíclico (CS)**

El proceso de calibración se dividió en tres fases: Fase 1 (25%, 50% y 67% de deformación), Fase 2 (100% de deformación) y Fase 3 (75% de deformación). Este enfoque fue necesario debido a la falla de la calibración al intentar ajustar los datos utilizando un solo conjunto de coeficientes en todas las deformaciones, como se muestra en la Figura 33, Figura 34, Figura 35 y la Tabla 4. Es probable que la falla haya ocurrido porque, en las pruebas de la vida real, factores como movimientos menores, desgaste del material o reorganización de partículas dentro de la matriz afectan la respuesta de la muestra a diferentes niveles de deformación. Al dividir la calibración, se lograron predicciones más precisas del comportamiento del material.

La rigidez horizontal, estimada mediante la Eq. 7, junto con la capacidad de disipación de energía, confirma la precisión del modelo en la simulación del rendimiento del aislador en condiciones sísmicas. Con valores de error que oscilan entre el 2% y el 10% en rigidez y entre el 7% y el 18% en amortiguación, los resultados demuestran que la división de la calibración en fases conduce a simulaciones altamente precisas, prediciendo eficazmente la capacidad de los aisladores para gestionar las cargas sísmicas. Además, el análisis de los coeficientes muestra una tendencia similar a los resultados de compresión, con una rigidez horizontal significativamente menor que la rigidez vertical, como se espera para un aislador. Como se muestra en la Tabla 4, el coeficiente del módulo de corte ( $\mu_0$ ) es un 33% menor, lo que indica que el modelo refleja con precisión el comportamiento de los prototipos reales. La reducción en el módulo de corte y el coeficiente de estiramiento límite ( $N_0$ ) a medida que aumenta la deformación sugiere que el modelo numérico se está adaptando a deformaciones más grandes al reducir el módulo de corte y limitar el alcance de la deformación. Esto puede ser una representación del desgaste del RRM cuando se está probando, también esto garantiza la estabilidad numérica y predicciones precisas del rendimiento del prototipo.

*Tabla 4. Parámetros de material calibrados para corte cíclico.*

<b>BB Coeff.</b>	<b>CS (25%,50%,67%)</b>	<b>CS (100%)</b>	<b>CS (75%)</b>
$\mu_0$ [MPa]	3.7	2.5	3.1
$N_0$	18.6	14.8	15.4
$\mu_1$ [MPa]	5.3	24.1	27.5
$N_1$	18.6	14.8	15.4
Fac	1.3	0.8	0.9
C	-5.0	-2.0	-6.7
m	36.7	30.8	31.0

Tabla 4. Parámetros de material calibrados para corte cíclico.

BB Coeff.	CS (25%,50%,67%)	CS (100%)	CS (75%)
D [MPa <sup>-1</sup> ]	0.0	0.0	0.0

Tabla 5. Valores de comparación de  $K_H$  y  $\beta$  entre datos experimentales y calibrados.

%DM	25% DM		50% DM		67% DM	
	$K_H$ [N/mm]	$\beta$ [%]	$K_H$ [N/mm]	$\beta$ [%]	$K_H$ [N/mm]	$\beta$ [%]
EXP	580.3	11.4	450.5	12.3	385.2	12.9
FEM-1	522.9 (-9.9%)	12.0 (5.3%)	431.2 (-4.3%)	13.3 (8.1%)	376.1 (-2.4%)	12.5 (-3.1%)
FEM	522.9 (-9.9%)	12.3 (7.9%)	431.2 (-4.3%)	13.1 (6.5%)	377.6 (-2.0%)	12.6 (-2.3%)

%DM	100% DM		75% DM	
	$K_H$ [N/mm]	$\beta$ [%]	$K_H$ [N/mm]	$\beta$ [%]
EXP	230.3	26.3	288.0	18.3
FEM-1	281.5 (22.2%)	12.8 (-51.3%)	342.9 (19.1%)	13.3 (-27.3%)
FEM	245.6 (6.6%)	24.9 (-5.3%)	297.8 (3.4%)	15.0 (-18.0%)

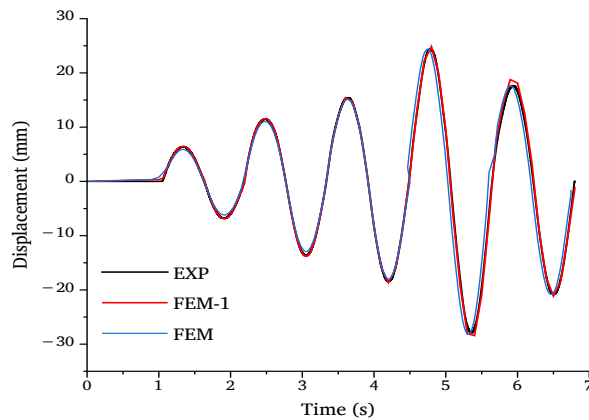
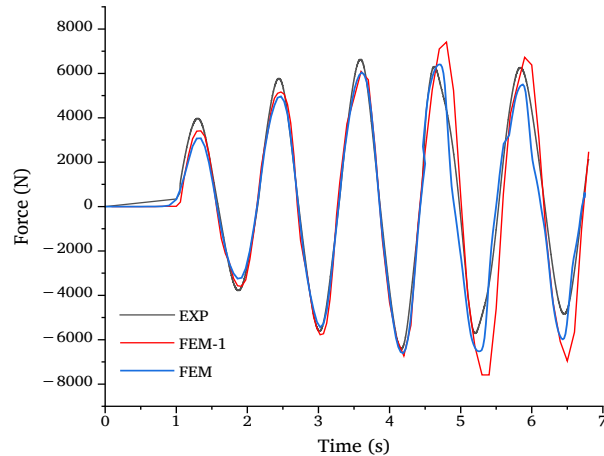
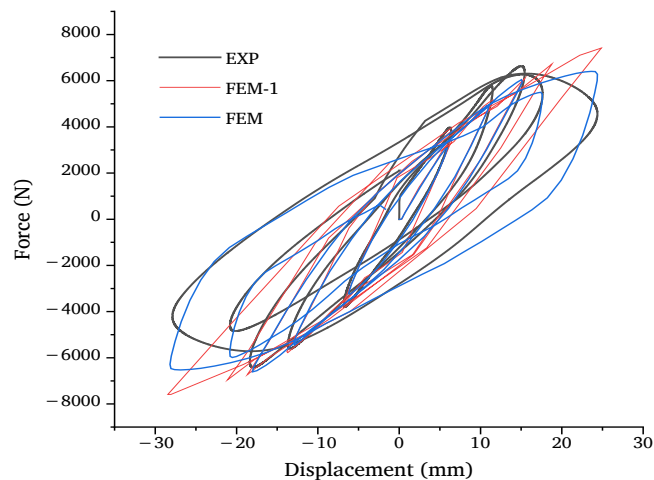


Figura 33. Resultados del corte cíclico: desplazamiento en el tiempo



*Figura 34. Resultados del corte cíclico: tiempo-fuerza*



*Figura 35. Resultados del corte cíclico: fuerza – desplazamiento*

## 10. CONCLUSIONES Y DISCUSIÓN

Este estudio investigó las propiedades del material de caucho reciclado (RRM) para aplicaciones de aislamiento sísmico a través de un enfoque integrado de caracterización experimental y simulaciones del Método de Elementos Finitos (FEM). La investigación empleó el modelo de Bergström-Boyce (BB), un modelo de material basado en la fenomenología adecuado para capturar el comportamiento no lineal en elastómeros y materiales biológicos. La naturaleza empírica del modelo BB demostró ser apropiada para

modelar materiales reciclados, ya que puede explicar las imperfecciones intrínsecas y los comportamientos complejos de los materiales a través de sus relaciones no lineales de tensión-deformación, características de fluencia y propiedades dependientes de la velocidad. Esta flexibilidad ayudó a lograr predicciones razonables del comportamiento de RRM, que los modelos constitutivos tradicionales encontraron difícil de capturar.

En la comparación entre el caucho natural (NR) y el caucho reciclado (RR/RRM), los ensayos de caracterización revelaron diferencias significativas en sus propiedades mecánicas. En el ensayo de tensión uniaxial, el RR demostró ser 1.2 veces más rígido que el NR al mismo nivel de deformación (47%), alcanzando una resistencia última a la tensión de 1.62 MPa con 7.2% de coeficiente de variación, manteniendo sin embargo características hiperelásticas adecuadas para aplicaciones de aislamiento. En términos de corte simple, el RR exhibió un módulo de corte de 1.92 MPa (13.7% CV), aproximadamente dos veces mayor que el módulo de 0.93 MPa del NR, aunque esta mayor rigidez no impide que pueda diseñarse para disipar la energía requerida mientras mantiene costos más bajos. En cuanto al comportamiento de fluencia (creep), el RR mostró una tasa de 0.0027 mm/h (8.0% CV), 2.3 veces mayor que la tasa de 0.0012 mm/h del NR, una diferencia que puede atribuirse a los espacios intersticiales en el RRM dejados sin ocupar por el aglomerante o por la geometría del caucho triturado. Particularmente notable fue el comportamiento en el ensayo de relajación, donde el RR mostró una tasa de pérdida de carga de 0.012 MPa/h (2.2% CV), significativamente menor que los 4.09 MPa/h del NR, lo que indica que el RRM pierde su capacidad de carga aproximadamente 340 veces más lentamente que el NR, una característica especialmente valiosa para aplicaciones que requieren un rendimiento prolongado del material. Estas diferencias en el comportamiento mecánico pueden explicarse por varias características estructurales del RR, incluyendo su naturaleza no monolítica, la presencia de espacios intersticiales en la matriz, la geometría específica de las partículas de caucho triturado y las particularidades del proceso de fabricación que incluye el uso de aglomerantes; sin embargo, a pesar de estas diferencias, los resultados demuestran que el RR representa una alternativa viable para aplicaciones de aislamiento sísmico, ofreciendo un compromiso favorable entre rendimiento mecánico y costo.

Una característica importante de esta investigación fue su enfoque de calibración utilizando cinco modos de deformación diferentes simultáneamente: compresión uniaxial, tensión, corte simple, fluencia y relajación. Esta estrategia de calibración multimodal difiere de los estudios anteriores que normalmente se centraban en los modos de deformación individuales. Al calibrar los parámetros del material utilizando todas las pruebas experimentales al mismo tiempo, el estudio logró una caracterización más completa del comportamiento del material. Este enfoque de calibración simultánea contribuyó a que el modelo BB mostrara el porcentaje de error más bajo, con un 8%, en comparación con otros modelos como Arruda-Boyce (24%), Mooney-Rivlin (27%), Ogden (28%) y Neo-Hookean (25%).

La investigación desarrolló una estrategia de calibración dividida para diferentes intervalos de deformación después de observar que los coeficientes de un solo conjunto en todos los rangos de deformación proporcionaban una precisión insuficiente.

Al implementar múltiples conjuntos de coeficientes para diferentes rangos de deformación, el estudio logró indicadores de error mejorados en todas las condiciones de prueba. El modelo calibrado mostró buena concordancia con los datos experimentales, con errores promedio de -10.5% en rigidez vertical, 5.2% en rigidez horizontal y 8.0% en relación de amortiguamiento. Esta precisión fue particularmente relevante en la simulación de la compresión cíclica y el comportamiento de corte de los aisladores RRM reforzados con textiles. El análisis apoyó tanto las capacidades predictivas del modelo FEM con los coeficientes de material BB como los beneficios potenciales de la metodología de calibración. La aplicación de la calibración multimodal simultánea y los enfoques de intervalo de deformación particionado contribuye al campo del diseño de aislamiento sísmico.

Esta metodología podría ayudar a informar sobre futuros enfoques de caracterización de materiales y modelado numérico, particularmente para materiales como RRM, lo que podría ofrecer un marco adicional para el desarrollo de aisladores. Estos hallazgos sugieren posibilidades para reducir los requisitos de pruebas experimentales



mientras se mantiene una confianza aceptable en las predicciones de rendimiento, lo que podría ayudar a hacer más accesible el diseño y la optimización de los aisladores sísmicos.

## 11. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ali, A., Hosseini, M., & Sahari, B. B. (2010). A Review of Constitutive Models for Rubber-Like Materials. *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, 3(1), 232–239. <https://doi.org/10.3844/ajeassp.2010.232.239>
- Amin, A. F. M. S., Lion, A., Sekita, S., & Okui, Y. (2006). Nonlinear dependence of viscosity in modeling the rate-dependent response of natural and high damping rubbers in compression and shear: Experimental identification and numerical verification. *International Journal of Plasticity*, 22(9), 1610–1657. <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2005.09.005>
- ANSYS Inc. (s/f). ANSYS Workbench 2023 R2. <https://www.ansys.com/>
- Arruda, E. M., & Boyce, M. C. (1993). A THREE-DIMENSIONAL CONSTITUTIVE MODEL FOR THE LARGE STRETCH BEHAVIOR OF RUBBER ELASTIC MATERIALS. *Journal of Mechanics Physics and Solids*, 41(2), 389–412.
- Avril, S., & Evans, S. (2017). *Material Parameter Identification and Inverse Problems in Soft tissue Biomechanics*. <http://www.springer.com/series/76>
- Bard, Y. (1973). *Nonlinear Parameter Estimation*.
- Belytschko, T., Wing, K. L., Moran, B., & Elkhodary, K. I. (2014). *Nonlinear Finite Elements for Continua and Structures Nonlinear Finite Elements for Continua and Structures*. [www.wiley.com/go/belytschko](http://www.wiley.com/go/belytschko)
- Bergström, J. (2015). *Mechanics of Solid Polymers*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2013-0-15493-1>
- Bergström, J. S., & Boyce, M. C. (2000). Large strain time-dependent behavior of filled elastomers. *Mechanics of Materials*, 32(11), 627–644. [https://doi.org/10.1016/S0167-6636\(00\)00028-4](https://doi.org/10.1016/S0167-6636(00)00028-4)
- Boyce, M. C., & Arruda, E. M. (2000). Constitutive Models of Rubber Elasticity: A Review. *Rubber Chemistry and Technology*, 73(3), 504–523. <https://doi.org/10.5254/1.3547602>
- Brown, R. (2006). *Physical Testing of Rubber*.
- Charlton, D. J., Yang, J., & Teh, K. K. (1994). Review of methods to characterize rubber elastic behavior for use in finite element analysis. *En Rubber Chemistry and Technology* (Vol. 67, Número 3, pp. 481–503). <https://doi.org/10.5254/1.3538686>
- Chopra, A. K. (2012). *DYNAMICS OF STRUCTURES: Theory and Applications to Earthquake Engineering*.

- Christensen, R. M. (1982). *THEORY OF VISCOELASTICITY: An Introduction (Second Edition)*.
- Cilento, F., Losanno, D., & Piga, L. (2022). An experimental study on a novel reclaimed rubber compound for fiber-reinforced seismic isolators. *Structures*, 45, 9–22. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.09.009>
- Costa, C., & Audin, L. (2021). Introduction to the special issue on hazardous faults in Latin America. *Journal of South American Earth Sciences*, 112. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2021.103569>
- Findley, W. N., Lai, J. S., & Onaran, Kasif. (1989). *Creep and relaxation of nonlinear viscoelastic materials : with an introduction to linear viscoelasticity*. Dover.
- Habieb, A. B. (2020). *Recycled Rubber-Fiber Reinforced Elastomeric Isolators for Seismic Protection in Developing Countries [Doctoral Thesis]*. Politecnico di Milano.
- Habieb, A. B., Formisano, A., Milani, G., & Pianese, G. (2022). Seismic performance of Unbonded Fiber-Reinforced Elastomeric Isolators (UFREI) made by recycled rubber. Influence of suboptimal crosslinking. *Engineering Structures*, 256. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114038>
- Habieb, A. B., Milani, G., Cerchiaro, R., Quaglini, V., & Milani, F. (2021). Numerical study on rubber compounds made of reactivated ethylene propylene diene monomer for fiber reinforced elastomeric isolators. *Polymer Engineering and Science*, 61(1), 258–277. <https://doi.org/10.1002/pen.25573>
- Habieb, A. B., Milani, G., & Tavio, T. (2018). Two-step advanced numerical approach for the design of low-cost unbonded fiber reinforced elastomeric seismic isolation systems in new masonry buildings. *Engineering Failure Analysis*, 90, 380–396. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2018.04.002>
- Habieb, A. B., Valente, M., & Milani, G. (2019a). Base seismic isolation of a historical masonry church using fiber reinforced elastomeric isolators. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 120, 127–145. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2019.01.022>
- Habieb, A. B., Valente, M., & Milani, G. (2019b). Implementation of a simple novel Abaqus user element to predict the behavior of unbonded fiber reinforced elastomeric isolators in macro-scale computations. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 17(5), 2741–2766. <https://doi.org/10.1007/s10518-018-00544-6>
- He, H., Zhang, Q., Zhang, Y., Chen, J., Zhang, L., & Li, F. (2022). A comparative study of 85 hyperelastic constitutive models for both unfilled rubber and highly filled rubber nanocomposite material. *Nano Materials Science*, 4(2), 64–82. <https://doi.org/10.1016/j.nanoms.2021.07.003>

- Ho, K. C., Chan, M. K., Chen, Y. M., & Subhramaniyun, P. (2023). Treatment of rubber industry wastewater review: Recent advances and future prospects. *En Journal of Water Process Engineering* (Vol. 52). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.103559>
- Holzapfel, G. A., & Gasser, T. C. (2001). A viscoelastic model for fiber-reinforced composites at finite strains: Continuum basis, computational aspects and applications. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 190.
- Íñiguez-Macedo, S., Lostado-Lorza, R., Escribano-García, R., & Martínez-Calvo, M. ángeles. (2019). Finite element model updating combined with multi-response optimization for hyper-elastic materials characterization. *Materials*, 12(7). <https://doi.org/10.3390/ma12071019>
- Johnson, A. R., & Quigley, C. J. (1992). A Viscohyperelastic Maxwell Model for Rubber Viscoelasticity. *Rubber Chemistry and Technology*, 1(65), 137–153.
- Johnson, A. R., Quigley, C. J., & Freese, C. E. (1995). A viscohyperelastic finite element model for rubber. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 127(1–4), 163–180. [https://doi.org/10.1016/0045-7825\(95\)00833-4](https://doi.org/10.1016/0045-7825(95)00833-4)
- Kang, B. S., Kang, G. J., & Moon, B. Y. (2003). Hole and lead plug effect on fiber reinforced elastomeric isolator for seismic isolation. *Journal of Materials Processing Technology*, 140(1–3), 592–597. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(03\)00798-2](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(03)00798-2)
- Kelly, J. M. (1997). *Earthquake-Resistant Design with Rubber*. En *Earthquake-Resistant Design with Rubber*. Springer London. <https://doi.org/10.1007/978-1-4471-0971-6>
- Kelly, J. M., & Konstantinidis, D. A. (2011). *Mechanics of Rubber Bearings for Seismic and Vibration Isolation*. Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119971870>
- Khajehsaeid, H., Arghavani, J., Naghdabadi, R., & Sohrabpour, S. (2014). A visco-hyperelastic constitutive model for rubber-like materials: A rate-dependent relaxation time scheme. *International Journal of Engineering Science*, 79, 44–58. <https://doi.org/10.1016/j.ijengsci.2014.03.001>
- Kim, B., Lee, S. B., Lee, J., Cho, S., Park, H., Yeom, S., & Park, S. H. (2012). A comparison among Neo-Hookean model, Mooney-Rivlin model, and Ogden model for Chloroprene rubber. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 13(5), 759–764. <https://doi.org/10.1007/s12541-012-0099-y>
- Kleuter, B., Menzel, A., & Steinmann, P. (2007). Generalized parameter identification for finite viscoelasticity. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 196(35–36), 3315–3334. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2007.03.010>
- Lakes, R. S. (2018). *Viscoelastic Solids*.

- Lemos-Micolta, E., Velasco-Cuervo, I., Patiño, E., Salmerón-Becerra, M., Lopez-Arias, M., Dyke, S., Velay-Lizancos, M., Madera-Sierra, I., Rojas, A., & Cundumí, O. (2024). *Assessment of the mechanical properties of low-cost seismic isolators exposed to environmental conditions.*
- Lizarazo, S. C., Sagiya, T., & Mora-Páez, H. (2021). *Interplate coupling along the Caribbean coast of Colombia and its implications for seismic/tsunami hazards. Journal of South American Earth Sciences, 110.* <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2021.103332>
- Losanno, D., Calabrese, A., Madera-Sierra, I. E., Spizzuoco, M., Marulanda, J., Thomson, P., & Serino, G. (2022). *Recycled versus Natural-Rubber Fiber-Reinforced Bearings for Base Isolation: Review of the Experimental Findings. Journal of Earthquake Engineering, 26(4), 1921–1940.* <https://doi.org/10.1080/13632469.2020.1748764>
- 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, 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.* <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.110003>
- Luo, R. K., Zhou, X., & Tang, J. (2016). *Numerical prediction and experiment on rubber creep and stress relaxation using time-dependent hyperelastic approach. Polymer Testing, 52, 246–253.* <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2016.03.026>
- Mackerle, J. (2004). *Rubber and rubber-like materials, finite-element analyses and simulations, an addendum: A bibliography (1997-2003). Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering, 12(5), 1031–1053.* <https://doi.org/10.1088/0965-0393/12/5/018>
- Madera, I. E. (2018). *DESARROLLO TECNOLÓGICO DE UN AISLADOR SÍSMICO DE BAJO COSTO PARA EDIFICACIONES BAJAS. En Universidad del Valle.*
- Madera, 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, 894–906.* <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.01.037>
- Madera Sierra, I. E. (2018). *Desarrollo tecnológico de un aislador sísmico de bajo costo para edificaciones bajas [Doctoral thesis to opt for the title of Ph.D in Engineering with Solid Mechanics of the Universidad del Valle-Colombia, 2018].*

- 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, 894–906. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.01.037>
- Madera Sierra, I. E., Marulanda Casas, J., & 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.
- Melly, S. K., Liu, L., Liu, Y., & Leng, J. (2021). A review on material models for isotropic hyperelasticity. *International Journal of Mechanical System Dynamics*, 1(1), 71–88. <https://doi.org/10.1002/msd2.12013>
- Meza-Muñoz, A. O., Rivas-Ordoñez, F. S., Madera-Sierra, I. E., Rojas-Manzano, M. A., Patino-Reyes, E. D., Salmerón-Becerra, M. I., & Dyke, S. J. (2024). Development of a Matrix for Seismic Isolators Using Recycled Rubber from Vehicle Tires. *Polymers*, 16(21), 2977. <https://doi.org/10.3390/polym16212977>
- Moaveni, S. (2015). *Finite element analysis Theory and Application with ANSYS (Global Edition)*. [www.FreeEngineeringbooksPdf.com](http://www.FreeEngineeringbooksPdf.com)
- Montgomery, D. C., Peck, E. A., & Vining, G. G. (2012). *Introduction to Linear Regression Analysis (Wiley)*.
- Mooney, M. (1940). A theory of large elastic deformation. *Journal of Applied Physics*, 11(9), 582–592. <https://doi.org/10.1063/1.1712836>
- Moran, R., Smith, J. H., & García, J. J. (2014). Fitted hyperelastic parameters for Human brain tissue from reported tension, compression, and shear tests. *Journal of Biomechanics*, 47(15), 3762–3766. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2014.09.030>
- Muñoz Bermudez, A. S. (2017). *Caracterización mecánica del elastómero empleado en un aislador sísmico desarrollado en Colombia [Bachelor's thesis to opt for the title of Civil Engineer of the Universidad del Valle-Colombia, 2017]*. Universidad del Valle.
- Muñoz-Gutierrez, L. A., Rodriguez-Piedrahita, J. S., Rivas-Ordoñez, F. S., Meza-Muñoz, A. O., Madera-Sierra, I. E., & Jaramillo, G. (2024). Methodological proposal for predicting the vertical and horizontal stiffness of unbonded fiber-reinforced recycled rubber seismic isolators through finite element analysis.
- Naciones Unidas. (2015). *Objetivos de desarrollo sostenible*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>
- Naeim, Farzad., & Kelly, J. M. (1999). *Design of seismic isolated structures : from theory to practice*. John Wiley.

- Nicholson, D. W., & Nelson, N. W. (1990). *Finite-Element Analysis in Design with Rubber. Rubber Chemistry and Technology*, 63(3), 368–406. <https://doi.org/10.5254/1.3538262>
- Nicholson, D. W., Nelson, N. W., Lin, B., & Farinella, A. (1998). *Finite element analysis of hyperelastic components. Applied Mechanics Reviews*, 51(5), 303–320. <https://doi.org/10.1115/1.3099007>
- Ogden, R. W. (1972). *Large deformation isotropic elasticity – on the correlation of theory and experiment for incompressible rubberlike solids. Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences*, 326(1567), 565–584. <https://doi.org/10.1098/rspa.1972.0026>
- Ogden, R. W. (1997). *Non-Linear Elastic Deformations*.
- Ogden, R. W., Saccomandi, G., & Sgura, I. (2004). *Fitting hyperelastic models to experimental data. Computational Mechanics*, 34(6), 484–502. <https://doi.org/10.1007/s00466-004-0593-y>
- Ortega, L. F. (2022). *Prototipos de aisladores sísmicos con matriz de caucho reciclado para la mitigación de riesgo en estructuras [Master's thesis to opt for the title of Master in Civil Engineering of the Universidad del Valle-Colombia, 2022]*. Universidad del Valle.
- Ortega, L. F., Herazo, M. Z., Ortiz, A. R., Thomson, P., & Marulanda, J. (2023a). *Performance of prototype seismic isolators reinforced with fiber and a recycled rubber tire matrix. Engineering Structures*, 278(December 2022), 115422. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.115422>
- Ortega, L. F., Herazo, M. Z., Ortiz, A. R., Thomson, P., & Marulanda, J. (2023b). *Performance of prototype seismic isolators reinforced with fiber and a recycled rubber tire matrix. Engineering Structures*, 278. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.115422>
- Osgoeei, P. M., Van Engelen, N. C., Konstantinidis, D., & Tait, M. J. (2015). *Experimental and finite element study on the lateral response of modified rectangular fiber-reinforced elastomeric isolators (MR-FREIs). Engineering Structures*, 85, 293–303. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.11.037>
- PolymerFEM. (2023). *MCalibration*.
- PolyUMod. (s/f). *Veryst Engineering (MCalibration)*. <http://PolyUMod.com>
- Powell, M. J. D. (2004). *The NEWUOA software for unconstrained optimization without derivatives*. [https://www.damtp.cam.ac.uk/user/na/NA\\_papers/NA2004\\_08.pdf](https://www.damtp.cam.ac.uk/user/na/NA_papers/NA2004_08.pdf)
- Press, W. H., Teukolsky, S. A., Vetterling, W. T., & Flannery, B. P. (2007). *NUMERICAL RECIPES: The Art of Scientific Computing*.



- Qi, J., Hu, M., Xu, P., Zhu, F., Yuan, H., Wang, Y., & Chen, Y. (2023). Study on pyrolysis of waste tires and condensation characteristics of products in a pilot scale screw-propelled reactor. *Fuel*, 353. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.129225>
- Revista Semana. (2021). En Colombia, cada año 950.000 llantas usadas van a parar a la basura. 1–10. <https://www.semana.com/economia/inversionistas/articulo/en-colombia-cada-ano-950000-llantas-usadas-van-a-parar-a-la-basura/202129/>
- Rivas-Ordóñez, F. S., Meza-Munoz, A. O., Madera-Sierra, I. E., Rojas-Manzano, M. A., Patino, E. D., Salmerón-Becerra, M. I., & Dyke, S. J. (2024). Alternatives for Enhancing Mechanical Properties of Recycled Rubber Seismic Isolators. *Polymers*, 16(16), 2258. <https://doi.org/10.3390/polym16162258>
- Rivling, R. S. (1948). Large elastic deformations of isotropic materials IV. further developments of the general theory. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 241(835), 379–397. <https://doi.org/10.1098/rsta.1948.0024>
- Román, A. J., Qin, S., Rodríguez, J. C., González, L. D., Zavala, V. M., & Osswald, T. A. (2022). Natural Rubber Blend Optimization via Data-Driven Modeling: The Implementation for Reverse Engineering. *Polymers*, 14(11), 1–27. <https://doi.org/10.3390/polym14112262>
- Samešová, D., Poništ, J., Hybská, H., Pochyba, A., Schwarz, M., & Salva, J. (2023). Determination of aerobic and anaerobic biological degradability of waste tyres. *Environmental Sciences Europe*, 35(1). <https://doi.org/10.1186/s12302-023-00723-6>
- Saremi, E., & Toopchi-Nezhad, H. (2021). Finite element modeling of horizontal load-displacement hysteresis loops in unbonded elastomeric isolators. *Structures*, 34, 2987–2995. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.08.095>
- 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>
- Tanaka, M., & Dulikravich, G. S. (1998). *Inverse Problems in Engineering Mechanics*. En 1998.
- Trebar, M., Susteric, Z., & Lotric, U. (2007). Predicting mechanical properties of elastomers with neural networks. *Polymer*, 48(18), 5340–5347. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2007.07.030>
- UNESCO. (2022). *DISASTER RISK REDUCTION*. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000384000>



- Van Engelen, N. C. (2019). *Fiber-reinforced elastomeric isolators: A review*. En *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* (Vol. 125). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2019.03.035>
- Van Engelen, N. C., Osgooei, P. M., Tait, M. J., & Konstantinidis, D. (2014). *Experimental and finite element study on the compression properties of Modified Rectangular Fiber-Reinforced Elastomeric Isolators (MR-FREIs)*. *Engineering Structures*, 74, 52–64. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.04.046>
- Van Engelen, N. C., Tait, M. J., & Konstantinidis, D. (2019). *Investigation of partially bonded fiber-reinforced elastomeric isolators (PB-FREIs) with nominal vertical tensile loads*. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 46(8), 669–676. <https://doi.org/10.1139/cjce-2018-0014>
- Van Ngo, T., Dutta, A., & Deb, S. K. (2017). *Evaluation of horizontal stiffness of fibre-reinforced elastomeric isolators*. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 46(11), 1747–1767. <https://doi.org/10.1002/eqe.2879>
- Velasco-Cuervo, I. C. (2024). *Análisis del efecto del envejecimiento y los cambios de temperatura en las propiedades mecánicas de los aisladores sísmicos de bajo costo*. Pontificia Universidad Javeriana Cali.
- Wan, X., Zhang, Y., Zhang, Q., Zhang, L., & Li, F. (2024). *User subroutines platform development for rubber hyperelastic constitutive models and its application in finite element analysis*. *Computational Materials Science*, 237. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2024.112885>
- 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, 115108. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.115108>
- Yang, H., Xiao, R., Yang, Z., & Lei, D. (2019). *Test Method Experimental characterization and finite element modeling the deformation behavior of rubbers with geometry defects*. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2019.106111>
- Yenigun, B., Gkouti, E., Barbaraci, G., & Czekanski, A. (2022). *Identification of Hyperelastic Material Parameters of Elastomers by Reverse Engineering Approach*. *Materials*, 15(24). <https://doi.org/10.3390/ma15248810>
- Yeoh, O. H. (1993). *Some forms of the strain energy function for rubber*. GenCorp Research.
- Zhang, Z., Wang, Y., Liu, P., Chen, T., Hou, G., Xu, L., Wang, X., Hu, Z., Liu, J., & Zhang, L. (2021). *Quantitatively predicting the mechanical behavior of elastomers via fully*

*atomistic molecular dynamics simulation. Polymer, 223(December 2020), 123704.*  
<https://doi.org/10.1016/j.polymer.2021.123704>

## 12. GLOSARIO DE TERMINOS ESPECIALES

1. *Aislador*: Un dispositivo o material utilizado para reducir la transmisión de energía sísmica desde el suelo a una estructura.
2. *Amortiguamiento*: La capacidad de un sistema para disipar o reducir la energía cinética o vibracional, generalmente mediante la conversión de esta energía en calor.
3. *Creep*: La deformación lenta y gradual de un material bajo carga constante o prolongada a lo largo del tiempo. Es especialmente importante en materiales sometidos a altas temperaturas.
4. *Deformación unitaria*: La medida relativa de la deformación experimentada por un material en respuesta a una carga aplicada, generalmente expresada como el cambio de longitud o la deformación relativa dividida por la longitud original.
5. *Elasticidad*: La capacidad de un material para deformarse temporalmente cuando se le aplica una fuerza y luego regresar a su forma original una vez que se elimina la fuerza, siempre y cuando no se exceda su límite elástico.
6. *Elemento finito*: Un método numérico utilizado para aproximar y analizar el comportamiento de un objeto o estructura mediante la subdivisión en elementos más pequeños. Se utiliza para resolver problemas complejos de ingeniería, como el análisis de tensiones y deformaciones.
7. *Hiperelasticidad*: La propiedad de ciertos materiales de experimentar deformaciones grandes y reversibles en respuesta a las cargas aplicadas, más allá del rango de elasticidad lineal.
8. *Invariante de deformación*: Una medida de la deformación de un material que se mantiene constante independientemente del sistema de coordenadas utilizado. Proporciona información sobre el estado de deformación del material.
9. *Modelo constitutivo*: Una descripción matemática o teórica que representa el comportamiento mecánico de un material o sistema en respuesta a las cargas

aplicadas. Estos modelos se utilizan para predecir el comportamiento y realizar análisis estructurales.

10. *Probeta*: Una muestra representativa de un material que se utiliza para realizar pruebas y ensayos experimentales con el fin de evaluar sus propiedades mecánicas, como resistencia, elasticidad o ductilidad.
11. *Relajamiento*: La reducción gradual de la tensión o esfuerzo en un material bajo carga constante a lo largo del tiempo. Es similar al creep, pero se enfoca más en la disminución del esfuerzo en lugar de la deformación.
12. *Viscoelasticidad*: La combinación de propiedades elásticas (recuperación después de una deformación) y viscosas (flujo o deformación continua bajo una carga constante) que exhiben algunos materiales, como ciertos polímeros y tejidos biológicos.

### **13. AGRADECIMIENTOS**

Deseamos expresar nuestro sincero agradecimiento al Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación de Colombia (MinCiencias) por su generoso apoyo al proyecto titulado "SGR-Jóvenes Investigadores Valle – Chocó – Cauca – Nariño – BPIN 2022000100068, Modelar numéricamente aisladores sísmicos fibro-reforzados con matriz de caucho reciclado a partir de sus propiedades viscoelásticas e hiperelásticas". También "Proyecto CUT 04 de la Convocatoria Interna Por Una Universidad Transformadora-2022" de la Pontificia Universidad Javeriana de Cali, departamento de Ingeniería Civil e Industrial (E.D.L.M., M.A.R.M.) y Fullbright Colombia. Agradecemos a la Pontificia Universidad Javeriana Cali por brindar las facilidades para nuestra investigación. Un agradecimiento especial al Dr. José Jaime García de la Universidad del Valle por su valiosa experiencia en el modelado de elementos finitos, y a Iván Otalvaro Calle, director de la Facultad de Ingeniería y Ciencias de la PUJC, por su liderazgo y apoyo. También hacemos extensivo nuestro agradecimiento a la Fundación para el Fomento de la Investigación y la Tecnología (FPIT) por su apoyo a través de la Convocatoria 2023, Acuerdo 202323. Agradecer a las empresas

Surtidor Industrial S.A.S. y Occidental de Cauchos S.A.S. por su valioso apoyo en esta investigación. Especial gracias a todos aquellos amigos y familiares que me motivaron a perseguir este logro, te amo madre.