FICHA RESUMEN
TRABAJO DE GRADO DE MAESTRÍA

TITULO: "**ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE LOS AISLADORES SÍSMICOS DE BAJO COSTO EXPUESTOS A CONDICIONES MEDIOAMBIENTALES** "

1. ÉNFASIS: Estructural
2. TIPO DE PROYECTO: Profundización
3. ÁREA DE TRABAJO: Ingeniería estructural
4. ESTUDIANTE (S): Erika Daniela Lemos Micolta
5. CORREO ELECTRÓNICO: erikalemos08@javerianacali.edu.co; eridalemi@gmail.com
6. DIRECCIÓN Y TELÉFONO: Calle 27 #27-113, cel: 3155465339
7. DIRECTOR: Ingrid Elizabeth Madera Sierra
8. VINCULACIÓN DEL DIRECTOR (en la universidad): Externo
9. CORREO ELECTRÓNICO DEL DIRECTOR: ingrid.madera@correounivalle.edu.co
10. CO-DIRECTOR(ES) (Si aplica): Orlando Cundumi
11. GRUPO O EMPRESA QUE LO AVALA (Si aplica):
12. OTROS GRUPOS O EMPRESAS:
13. PALABRAS CLAVE (al menos 5): Aisladores sísmicos fibro-reforzados – Durabilidad- Agentes ambientales – Dióxido de carbono – Agua salada – Humedad relativa – Rayos UV – Edificación aislada
14. ODS QUE APLICA EL PROYECTO (Agenda 2030):
15. FECHA DE INICIO (Desarrollo del proyecto): 1/01/2023
16. RESUMEN (máximo 400 palabras).

En Colombia, los aislantes elastoméricos no adheridos reforzados con fibras de bajo costo hechos de caucho natural (UN-FREI) y caucho reciclado (UR-FREI) han surgido como una solución para reducir los daños en estructuras de baja altura durante los terremotos. Sin embargo, no se ha estudiado suficientemente su comportamiento frente a la degradación ambiental causada por factores como el dióxido de carbono, agua salada, humedad relativa y radiación UV. Estos agentes pueden comprometer las propiedades mecánicas del caucho, afectando su capacidad para disipar energía. Este estudio evaluó el comportamiento de los aislantes en diferentes condiciones ambientales mediante la caracterización inicial del caucho, ensayos mecánicos sobre prototipos a escala reducida expuestos a ambientes controlados y el análisis sísmico de una estructura aislada. Se determinaron factores de modificación ($\lambda_{ae,max}$ y $\lambda_{ae,min}$) que reflejan el efecto del cambio en las propiedades de los aisladores en el comportamiento estructural. Los resultados mostraron que la edificación con aisladores de UN-FREI y UR-FREI, presentan mayores derivas, cortantes basales e indices de sobreesfuerzos con $\lambda_{ae,max}$. Esto pone de manifiesto la necesidad de realizar ensayos sobre los aisladores para determinar factores de modificación que reflejen el efecto de las condiciones ambientales sobre las estructuras a lo largo de su vida útil.

DATOS ESTUDIANTE

Nombre: Erika Daniela Lemos Micolta

Dirección: Calle 78 #27-113 Cali

Teléfono de Contacto: 3155465339

Correo Electrónico: erikalemos08@javerianacali.edu.co, eridalemi@gmail.com

Ingeniera Civil

Empresa Emecé, Ingeniería, Sostenibilidad e Innovación SAS.

Ingeniera de proyectos

ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE LOS AISLADORES SÍSMICOS DE BAJO COSTO EXPUESTOS A CONDICIONES MEDIOAMBIENTALES

Programa de Maestría en Ingeniería Civil

Presentado por:

ERIKA DANIELA LEMOS MICOLTA

Directora: Ingrid E. Madera Sierra, PhD.
Codirector: Orlando Cundumi Sánchez, PhD.
Asesor: Manuel Alejandro Rojas, PhD.

Pontificia Universidad Javeriana Cali
Facultad de Ingeniería y Ciencias
Noviembre de 2024

Agradecimientos

A Dios, por ser mi guía constante y ayudarme en cada paso de este camino.
A mi madre, por su inquebrantable motivación y por creer en mí en todo momento. Gracias por ser mi mayor inspiración.
A mi familia, por su apoyo incondicional y por estar siempre a mi lado.
A mis amigos, cuyas palabras de ánimo nunca faltaron durante todo este proceso.
A mi directora de tesis y a los profesores, cuyas enseñanzas no solo me ayudaron a alcanzar los objetivos de este trabajo, sino también a crecer como profesional.

Al personal de PUJ Cali, PUJ Bogotá y Purdue University, por su apoyo.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN 1

1.1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN 4

1.2. OBJETIVOS DEL PROYECTO 6

1.2.1. Objetivo general 6

1.2.2. Objetivos específicos 6

1.3. JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO DE GRADO 6

MARCO DE REFERENCIA 11

1.4. Marco Teórico 11

1.5. Antecedentes 14

1.6. Estado del arte 18

DESARROLLO EXPERIMENTAL 20

1.7. Exposición a condiciones ambientales 20

1.7.1. Humedad relativa (HR) 20

1.7.2. Radiación UV 21

1.7.3. Agua salada 21

1.7.4. Carbonatación acelerada (CO_2) 21

1.8. Caracterización mecánica de probetas 22

1.9. Caracterización mecánica de prototipos a escala reducida 25

1.10. Características de las edificaciones tipo 26

RESULTADOS Y DISCUSIÓN 30

1.11. Caracterización mecánica de probetas 30

1.11.1. Humedad relativa (RH) 30

1.11.2. Radiación UV 34

1.11.3. Agua salada 36
1.11.4. Resumen de resultados de probetas 38
1.12. Caracterización mecánica de prototipos a escala reducida 40
1.12.1. Ensayo de corte compresión 40
1.12.2. Ensayo de compresión cíclica 43
1.12.3. Resumen de los resultados de los prototipos a pequeña escala 44
1.13. Evaluación de la respuesta sísmica de una estructura aislada en su base 45
CONCLUSIONES 49
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 50

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de flujo de diseño del aislador HDR (Modificado de Arriagada Rosas (2005)) 12

Figura 2. Tumba de Ciro el Grande (Tomado de https://es.wikipedia.org/wiki/Tumba_de_Ciro) 15

Figura 3. Esquema de aisladores de deslizamiento (Genatios and Lafuente, 2016) 16

Figura 4. Tipos de aisladores elastoméricos a) SREI, y b) UN-FREI. (Madera-Sierra, 2018). 17

Figura 5. Exposición a condiciones ambientales: a) cámara climática para HR, b) cámara de radiación UV y c) horno para secado de agua salada y d) cámara de carbonatación acelerada 22

Figura 6. Probetas para ensayos de: a) tensión, b) compresión monotónica y c) compresión residual 23

Figura 7. Probetas para el ensayo de cortante cíclica: a) UN-FREI y b) UR-FREI. 24

Figura 8. Dimensiones de los prototipos a escala reducida de UN-FREI y UR-FREI (Losanno et al., 2019) 25

Figura 9. a) ensayo de corte-compresión y b) ensayo de compresión cíclica 26

Figura 10. Protocolos de carga: a) ensayo de corte-compresión y b) ensayo de corte-compresión 26

Figura 11. Características de la estructura tipo analizada: a) 3D y b) espectro de respuesta ... 28

Figura 12. Dimensiones de aislador sísmico para edificación tipo 29

Figura 13. Curvas de masa ganada a lo largo del periodo según el tipo de probeta: a) tensión, b) compresión monotónica, c) compresión residual, d) prototipos de corte compresión y e) prototipos de compresión cíclica. 31

Figura 14. Resultados de humedad relativa para: a) tensión, b) compresión monotónica y c) compresión residual 32

Figura 15. Resultados de humedad relativa para cortante cíclica: a) módulo de corte (G), and b) razón de amortiguamiento (β) 33

Figura 16. Resultados de radiación UV para: a) tensión, b) compresión monotónica y c) compresión residual. 35

Figura 17. Resultados de radiación UV para cortante cíclica: a) módulo de corte (G), and b) razón de amortiguamiento ratio (β). 36

Figura 18. Resultados de exposición a agua salada para ensayos de: a) tensión, b) compresión monotónica y c) compresión residual 37

Figura 19. Resultados de exposición a agua salada para el ensayo de compresión cíclica: a) módulo de corte (G), and b) razón de amortiguamiento (β) 38

Figura 20. Amortiguamiento (β) vs deformación de corte (γ): a) CO2+RH UN-FREI, b) HR contante UN-FREI, c) CO2+RH UR-FREI, and d) HR constante UR-FREI 41

Figura 21. Rigidez horizontal (Kh) vs deformación de corte (γ): a) CO_2+RH UN-FREI, b) HR constante UN-FREI, c) CO_2+RH UR-FREI, y d) HR constante UR-FREI. 42

Figura 22. Rigidez vertical (Kv) de UN-FREI y UR-FREI a 23 días de exposición a RH..... 43

Figura 23. Comparación de derivas entre D_{TM}, D_{TM} max y D_{TM} min: a) UN-FREI y b) UR-FREI. 46

Figura 24. Comparación de cortantes por piso entre D_{TM}, D_{TM} max y D_{TM} min: a) UN-FREI y b) UR-FREI.)..... 47

Figura 25. Comparación de los índices de sobreesfuerzos entre D_{TM}, D_{TM} max y D_{TM} min: a) UN-FREI y b) UR-FREI. 48

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Límite superior e inferior por defecto para fabricantes desconocidos (Fuente: Tabla C17.2-6 ASCE 7-16) 14

Tabla 2. Características generales de la estructura tipo analizada 28

Tabla 3. Características generales del aislador sísmico 29

Tabla 4. Criterio de evaluación 39

Tabla 5. Evaluación de resultados de probetas de UN-FREI y UR-FREI 39

Tabla 6. Evaluación de los resultados de los prototipos a escala reducida de UN-FREI y UR-FREI 44

Tabla 7. Factores de modificación de condiciones ambientales 45

Tabla 8. Periodos según el factor de modificación 47

RESUMEN

En Colombia, los aislantes elastoméricos no adheridos reforzados con fibras de bajo costo hechos de caucho natural (UN-FREI) y caucho reciclado (UR-FREI) han surgido como una solución para reducir los daños en estructuras de baja altura durante los terremotos. Sin embargo, no se ha estudiado suficientemente su comportamiento frente a la degradación ambiental causada por factores como el dióxido de carbono, agua salada, humedad relativa y radiación UV. Estos agentes pueden comprometer las propiedades mecánicas del caucho, afectando su capacidad para disipar energía. Este estudio evaluó el comportamiento de los aislantes en diferentes condiciones ambientales mediante la caracterización inicial del caucho, ensayos mecánicos sobre prototipos a escala reducida expuestos a ambientes controlados y el análisis sísmico de una estructura aislada. Se determinaron factores de modificación ($\lambda_{ae,max}$ y $\lambda_{ae,min}$) que reflejan el efecto del cambio en las propiedades de los aisladores en el comportamiento estructural. Los resultados mostraron que la edificación con aisladores de UN-FREI y UR-FREI, presentan mayores derivas, cortantes basales e indices de sobreesfuerzos con $\lambda_{ae,max}$. Esto pone de manifiesto la necesidad de realizar ensayos sobre los aisladores para determinar factores de modificación que reflejen el efecto de las condiciones ambientales sobre las estructuras a lo largo de su vida útil.

Palabras clave: Aisladores sísmicos fibro-reforzados – Durabilidad- Agentes ambientales – Dióxido de carbono – Agua salada – Humedad relativa – Rayos UV – Edificación aislada

ABSTRACT

In Colombia, low-cost fiber-reinforced non-bonded elastomeric isolators made of natural rubber (UN-FREI) and recycled rubber (UR-FREI) have emerged as a solution to reduce damage in low-rise structures during earthquakes. However, their behavior against environmental degradation caused by factors such as carbon dioxide, salt water, relative humidity and UV radiation has not been sufficiently studied. These agents can compromise the mechanical properties of rubber, affecting its ability to dissipate energy. This study evaluated the behavior of the isolators in different environmental conditions through the initial characterization of the rubber, mechanical tests on small-scale prototypes exposed to controlled environments and the seismic analysis of an isolated structure. Modification factors ($\lambda_{ae,max}$ and $\lambda_{ae,min}$) reflecting the effect of the change in isolator properties on structural behavior were determined. The results showed that the building with UN-FREI and UR-FREI isolators, present higher drifts, basal shear and overstress indices with $\lambda_{ae,max}$. This highlights the need to perform tests on the isolators to determine modification factors that reflect the effect of environmental conditions on the structures throughout their service life.

Key words: Fiber-reinforced seismic isolators - Durability- Environmental agents - Carbon dioxide - Salt water - Relative humidity - UV rays - Isolated building.

1. INTRODUCCIÓN

Con el paso de los años, la Ingeniería Sísmica ha desarrollado sistemas de control que permiten proteger las edificaciones y salvaguardar la vida de cientos de personas. Los dispositivos de control para el aislamiento sísmico más usados actualmente son los aisladores elastoméricos y los aisladores deslizantes, y consisten en elementos que desacoplan la estructura del terreno, lo que permite reducir las vibraciones procedentes del suelo y así disminuir los daños ocasionados a la edificación durante un movimiento telúrico.

Inicialmente, se desarrollaron aisladores elastoméricos reforzados con láminas de acero como los usados en el edificio The William Clayton en Nueva Zelanda que fue terminado de construir en 1981 (Makris, 2019). Estos aisladores con refuerzo de acero eran pesados y costosos, por lo cual, su uso estaba justificado solo para edificios de gran importancia y con elevados costos de construcción (Kelly, 1999). Posteriormente, se crearon aisladores elastoméricos reforzados con fibra desconectados de la estructura (UN-FREIs) que, por su menor peso y reducción en costos de fabricación, permitieron la aplicación del sistema de aislamiento sísmico a edificios residenciales y comerciales de menor envergadura (Kelly, 1999). Adicionalmente, se han estudiado aisladores con incorporación de caucho reciclado reforzados con fibra y sin conexión a la estructura (UR-FREIs), para aumentar la oferta de aisladores sísmicos de bajo costo (Spizzuoco, Calabrese and Serino, 2014; Calabrese *et al.*, 2019). En este contexto, en Colombia se han diseñado y fabricado UN-FREIs (Madera-Sierra, 2018) y UR-FREIs (Ortega Escobar, 2021) mediante el uso de materiales disponibles a nivel nacional para poder reducir costos de importación y ensayos de validación.

Por otra parte, debido a la importancia de los dispositivos de control, la investigación de estos elementos no debe limitarse al análisis estructural, sino también a la Ingeniería de Materiales. Entender los cambios que el material con el que están hechos los aisladores puede tener con el paso del tiempo, permitirá considerar criterios de durabilidad en el diseño y establecer condiciones de funcionamiento con el fin de preservar las propiedades físico mecánicas iniciales.

Actualmente, la alteración en procesos naturales debido a la acción humana ha mostrado la necesidad de analizar el efecto de las condiciones medio ambientales sobre los materiales localizados en las estructuras. Con base en lo anterior, esta investigación estudió el efecto de la exposición a condiciones medioambientales como CO_2, agua salada, la humedad relativa y rayos

UV-A, en las propiedades mecánicas de la matriz de caucho natural y del material compuesto con caucho reciclado de los aisladores sísmicos de bajo costo desarrollados previamente en Colombia. Posteriormente, se fabricaron prototipos a escala reducida con los mismos materiales y se analizó el efecto de estas condiciones medio ambientales en sus propiedades mecánicas. Finalmente, con ayuda de un software de elementos finitos se modeló la respuesta sísmica de una estructura tipo aislada en su base con y sin exposición a condiciones medioambientales de los dispositivos de aislamiento.

1.1.DEFINICIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

El sismo ocurrido en el año 1960, con epicentro en Chile, ha sido catalogado como el mayor terremoto medido instrumentalmente en la historia humana, y tras cobrar la vida de cerca de tres mil personas y desplazar a más de dos millones de individuos (Pasqualini, 2022), es un claro ejemplo del poder de destrucción de estos eventos naturales. Los múltiples esfuerzos hechos en el campo de la Ingeniería Sísmica para reducir los efectos de los terremotos a nivel económico y social, ha permitido el desarrollo de elementos de control sísmico, los cuales han aportado al aumento de la resiliencia en muchas ciudades alrededor del mundo (Genatios and Lafuente, 2016).

Los aisladores sísmicos hechos de caucho natural de alto amortiguamiento y reforzados con láminas de acero (SREIs) son dispositivos de control ampliamente usados a nivel mundial. Sin embargo, hace unos años el mayor impedimento en Colombia para la aplicación de los SREIs era su gran peso y elevado costo de fabricación e importación, por lo cual, se desarrollaron aisladores elastoméricos reforzados con fibra de poliéster y desconectados de la estructura (UN-FREIs), fabricados completamente con materiales disponibles en el territorio colombiano, lo cual permitió reducir su costo y facilitar el proceso de validación al poderse ensayar en el país (Madera-Sierra, 2018). Adicionalmente, la financiación de un proyecto de investigación en conjunto con la Universidad Javeriana Cali (PUJ Cali) y la Universidad del Valle dio como resultado el desarrollo de prototipos a escala reducida de aisladores sin conexión a la estructura que incluyeron caucho reciclado de llantas en la matriz y fibra de poliéster como refuerzo (UR-FREIs) (Ortega Escobar, 2021), generando simultáneamente una mayor reducción en el costo de los aisladores y un aporte a la sostenibilidad de la industria de la construcción al incorporar un residuo de otro sector. Aunque se ha logrado un avance en el desarrollo de aisladores sísmicos de bajo costo fabricados en el país, ensayados bajo condiciones normales de funcionamiento, aún se deben realizar estudios que

permitan caracterizar el comportamiento de las mezclas de caucho frente a procesos de degradación natural para evitar una afectación en su desempeño a lo largo de su vida útil.

La degradación fisicoquímica de los materiales cementosos por agentes como el dióxido de carbono (CO2) de la atmósfera (Nilsson, 2019; Xu *et al.*, 2022), el agua salada de las zonas costeras (Alyami *et al.*, 2019; Qu *et al.*, 2021; Tansel and Zhang, 2022) y la humedad relativa son ejemplos de condiciones de exposición actuales que no se han estudiado en aisladores sísmicos de bajo costo, aunque estas condiciones han reducido la vida útil de las estructuras convencionales (Nilsson, 2019; Xu *et al.*, 2022). Dado que los UN-FREI y UR-FREI permanecerán instalados en el edificio durante varios años, es necesario determinar si las condiciones ambientales responsables de la degradación en las estructuras convencionales podrían afectar a las propiedades mecánicas de estos dispositivos de control sísmico y comprometer su función estructural. Además, los elastómeros y polímeros son materiales que sufren fotodegradación debido a la radiación ultravioleta (UV) del sol (Diepens and Gijsman, 2008; Boubakri *et al.*, 2010; Xie *et al.*, 2019), pero solo se ha analizado la influencia de este factor en los apoyos de caucho de puentes (Gu, Itoh and Satoh, 2005; Gu and Itoh, 2010) sin considerar la posible exposición de los UN-FREI y UR-FREI a los rayos UV durante su instalación o almacenamiento. Por tanto, se desconoce el efecto que estas condiciones ambientales tienen sobre el comportamiento de los aisladores sísmicos a lo largo de su vida útil y las implicaciones sobre la respuesta de la estructura aislada.

Con base en lo anterior, en esta tesis financiada con recursos de la Convocatoria Interna de la PUJ Cali y por la Convocatoria Externa del Banco de la República (Convenio 202323), se analizaron las propiedades mecánicas de los UN-FREIs y UR-FREIs expuestos a CO_2, agua salada, humedad relativa y rayos UV-A. Posteriormente, se estudió el efecto de algunas de estas condiciones ambientales sobre las propiedades mecánicas de prototipos a pequeña escala de aisladores sísmicos de bajo costo desarrollados en Colombia.

Finalmente, se determinaron factores de modificación por condiciones ambientales $\lambda_{ae,max}$ y $\lambda_{ae,min}$ a partir del cambio en las propiedades de los prototipos para posteriormente modelar la estructura con y sin estos factores. (Calabrese *et al.*, 2020) expusieron aisladores de caucho laminado reforzado con fibras (FRB) a envejecimiento por calor, y compararon la respuesta de una edificación de cuatro pisos aislada en la base con aisladores FRB y con aisladores de caucho de

alto amortiguamiento (HDRB). Se consideró el estado nuevo y envejecido de los dispositivos en la estructura, y se concluyó que la rigidez aumenta con el tiempo reduciendo la eficiencia del aislamiento y limitando su deformación, siendo más evidente en FRB. Determinar el cambio en las propiedades de los UN-FREI y UR-FREI permitirá evaluar el comportamiento de la edificación frente a cargas sísmicas, proporcionando información clave a los fabricantes. Esto contribuirá a optimizar las propiedades de los materiales, minimizando la pérdida de eficiencia durante su vida útil en servicio.

1.2.OBJETIVOS DEL PROYECTO

1.2.1. Objetivo general

Analizar las propiedades mecánicas de los aisladores sísmicos de bajo costo después de estar expuestos a diferentes condiciones medioambientales.

1.2.2. Objetivos específicos

- Caracterizar el comportamiento físico mecánico de la matriz de caucho natural y del material compuesto de caucho reciclado bajo el efecto de condiciones medioambientales.
- Determinar las propiedades mecánicas de prototipos de aisladores sísmicos de bajo costo a escala reducida expuestos a la acción del ambiente.
- Evaluar la respuesta sísmica de una estructura aislada en su base mediante dispositivos de bajo costo, antes y después de que estos sean expuestos a condiciones medioambientales.

1.3.JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO DE GRADO

Los sistemas de control sísmico se han desarrollado para reducir las afectaciones que sufren las estructuras tras la liberación de energía de un terremoto, y de esta forma proteger la vida de los seres vivos que permanecen al interior de las edificaciones, y aumentar la resiliencia de las ciudades (Genatios and Lafuente, 2016). Estos sistemas se dividen en pasivos, activos y semiactivos. Dentro de los pasivos se encuentran el sistema de aislamiento y el sistema de disipación, los cuales usan dispositivos llamados aisladores sísmicos y disipadores de energía, respectivamente. Mientras que los aisladores sísmicos desconectan a la estructura del suelo y reducen la energía del sismo que llega a la edificación (Madera-Sierra, 2018; Cilento, Losanno and Piga, 2022), los disipadores reducen la energía que es introducida en el sistema estructural

debido al terremoto (Genatios and Lafuente, 2016), todo esto con el fin de minimizar los daños ocasionados en la edificación. En las últimas décadas, los aisladores sísmicos han sido ampliamente usados para controlar la respuesta de las estructuras durante un evento telúrico debido a que no necesitan energía externa para funcionar y se pueden instalar en estructuras nuevas y en edificaciones previamente construidas (Cilento, Losanno and Piga, 2022).

En Colombia se han desarrollado aisladores sísmicos de bajo costo denominados UN-FREIs y UR-FREIs, hechos de caucho natural y de un material compuesto de caucho reciclado, respectivamente (Madera-Sierra, 2018; Ortega Escobar, 2021), y se espera que la vida útil de estos elementos sea similar a la vida útil de la estructura, la cual se estima en 50 años (Genatios and Lafuente, 2016); para así evitar incurrir en costos adicionales con el reemplazo anticipado de estos dispositivos.

Las estructuras de concreto y acero pueden presentar procesos de corrosión y degradación, los cuales se aceleran en la medida en que el cambio climático genera alteraciones en los agentes ambientales relacionados con esos procesos; por lo cual, al incluir la variabilidad del ambiente, se pueden contemplar escenarios de afectación más exactos y congruentes con la situación actual y futura del planeta Tierra (Bastidas-Arteaga *et al.*, 2010; Stewart, Wang and Nguyen, 2012; Stewart and Bastidas-Arteaga, 2019; Ramani and Zhang, 2022). Debido a que los UN-FREIs y UR-FREIs permanecerán instalados en la edificación durante varios años, es necesario determinar si las condiciones medioambientales responsables de la degradación en las estructuras convencionales podrían afectar las propiedades mecánicas de estos dispositivos de control sísmico y comprometer su función estructural. Entre las características que podrían influir en una mayor reducción de la resistencia de los aisladores de caucho reciclado, se destaca su estructura porosa, ya que, al igual que como ocurre en el concreto, una mayor porosidad facilita la entrada de compuestos químicos a la estructura generando procesos de degradación (Stroeven, Hu and Koleva, 2010; Sugandhini *et al.*, 2022).

Hasta el momento, los factores con mayor impacto en la corrosión y degradación de las estructuras son la temperatura, el dióxido de carbono (CO_2), el agua salada, y la humedad relativa (Bastidas-Arteaga *et al.*, 2010; Stewart and Bastidas-Arteaga, 2019).

La variabilidad de las propiedades de los elastómeros para apoyos de puentes y aisladores sísmicos, cuando son expuestos a cambios de temperatura ha sido ampliamente estudiada ya que,

estos dispositivos han sido instalados en regiones frías y países con diferentes estaciones durante el año (Billah and Todorov, 2019). Los resultados más relevantes indican que los elastómeros sufren procesos de cristalización y aumento de rigidez cuando son expuestos a bajas temperaturas (Fuller, Gough and Thomas, 2004; Cardone and Gesualdi, 2012). Una investigación simultánea a este proyecto, liderada por el Semillero de investigación EPSILON de la PUJ Cali, busca analizar el comportamiento de los aisladores sísmicos de bajo costo ante cambios de temperatura, por esta razón, en esta investigación no se analizó la temperatura como un agente independiente, pero dada su relación con otros agentes ambientales, se determinará una temperatura adecuada durante las condiciones de exposición consideradas.

Por otra parte, uno de los indicadores más relevantes para hablar del cambio climático es el CO_2. A partir de la Revolución Industrial se ha evidenciado un aumento significativo en los niveles de este gas en la atmósfera causado por la dependencia de los combustibles fósiles (Reichle, 2020), lo que ha dado lugar al calentamiento global (Stiling, 2009). Al CO_2 se le atribuyen efectos perjudiciales para el concreto armado como la disminución de su alcalinidad, que da paso a la corrosión del refuerzo, desprendimiento del concreto y la reducción de la resistencia al ataque de otros compuestos químicos corrosivos (Nilsson, 2019; Xu *et al.*, 2022). Además, de que la exposición a CO_2 a altas presiones puede generar degradación en algunos elastómeros (Lainé *et al.*, 2019), material del que están hechos los aisladores sísmicos.

En lo que respecta a las estructuras ubicadas en zonas costeras, estas tienen un mayor riesgo de verse afectadas por procesos de corrosión debido a que el aumento del nivel del mar favorece el ingreso de sulfatos en los poros de la estructura por la acción de las olas, y los ciclos de humedecimiento y secado generan una cristalización de las sales que termina degradando materiales como el concreto (Alyami *et al.*, 2019; Qu *et al.*, 2021; Tansel and Zhang, 2022). En elastómeros, el envejecimiento en agua de mar ha generado un aumento en la rigidez y ha acelerado la falla del material (Le Gac *et al.*, 2012). Lo anterior, sumado al hecho de que Colombia cuenta con grandes áreas costeras ubicadas en zona de amenaza sísmica alta, como lo es la región Pacífica (IDIGER, 2021), hace necesario el análisis del efecto del agua salada en los aisladores sísmicos de bajo costo, dado que se desconoce si a lo largo de la vida de servicio de estos dispositivos, puedan llegar a quedar expuestos a la acción del agua de mar en su estructura.

Entre las condiciones medioambientales también se debe considerar el cambio en el porcentaje de humedad relativa del aire, debido a que se ha determinado una relación con los procesos de degradación, tanto en concretos como en los polímeros estudiados (Turan and Poulis, 2020). Por otra parte, la humedad relativa puede variar significativamente de un lugar a otro. En Colombia, por ejemplo, departamentos como el Chocó cuentan con una humedad relativa entre 86% y 88%, mientras que Medellín entre 63% y 73% (IDEAM, 2015). Se observa entonces como en dos lugares del territorio colombiano, los aisladores sísmicos se someterían a humedades completamente diferentes, haciendo necesario analizar el efecto que estos cambios pueden generar en sus propiedades y comportamiento.

El aumento del dióxido de carbono también ha influido en el aumento de temporadas más secas con mayor radiación solar (Vaverková *et al.*, 2020; Payà, 2022). Para el caso particular de materiales poliméricos, estudios han demostrado que la exposición a rayos UV, provenientes de la radiación solar, puede generar degradación por reacciones termo-oxidativas y afectar la respuesta mecánica del material (Diepens and Gijsman, 2008; Boubakri *et al.*, 2010). Aunque los aisladores sísmicos normalmente se localizan entre la cimentación y la estructura, debido a la incertidumbre que se genera en el proceso de instalación y funcionamiento, se hace necesario aumentar el conocimiento sobre el proceso de fotodegradación que pueden ocasionar los rayos UV en la matriz de caucho natural y el compuesto de caucho reciclado de los dispositivos de control sísmico.

Aunque normativas como la ASCE 7-16 (2017) ha establecido unos factores de modificación de propiedades (λ) máximos y mínimos para considerar aspectos como temperatura, envejecimiento, condiciones ambientales y contaminación en el diseño de los aisladores sísmicos, debido a la incertidumbre en el proceso de manufactura de cada fabricante, es preferible generar factores de modificación para el caso particular de las matrices de caucho natural y el compuesto de caucho reciclado estudiadas en esta propuesta de investigación.

Finalmente, el estudio de la degradación de las estructuras con el paso del tiempo mediante modelos ha generado mayor claridad sobre cómo cambian la respuesta sísmica de estas estructuras (Gu, Itoh and Satoh, 2005; Calabrese *et al.*, 2020) , y cómo la inclusión de factores de seguridad, debido a la acción de agentes ambientales, mejora la respuesta de la edificación frente a procesos de deterioro. Por esta razón, la modelación de una estructura considerando el efecto de dichas condiciones medioambientales en los aisladores sísmicos de bajo costo instalados en ella, es

fundamental para garantizar tanto su correcto funcionamiento como el de los dispositivos sísmicos en el tiempo.

2. MARCO DE REFERENCIA

2.1.Marco Teórico

Le metodología actual de diseño sísmico busca que las estructuras disipen energía al entrar en un rango de comportamiento inelástico durante un movimiento telúrico sin que se presente el colapso de la edificación a fin de salvaguardar la vida de los ocupantes. Lo anterior, se logra al balancear la Ec. 1 (Genatios and Lafuente, 2016):

$$E_I = E_K + E_D + E_S + E_H \qquad \text{Ec. 1}$$

donde:

E_I es la energía introducida por las cargas dinámicas externas, sísmicas o de viento,

E_K es la energía cinética absoluta,

E_D es la energía disipada por amortiguamiento,

E_S es la energía de deformación elástica,

E_H es la energía histerética.

En una estructura aislada, se busca aumentar la disipación total de energía al considerar la energía adicional absorbida por dispositivos de control sísmico como aisladores, y de esta manera, la energía de deformación de la estructura original sería menor, reduciendo los daños causados tras un evento sísmico (Genatios and Lafuente, 2016).

En Colombia, el Título A sección A.3.8 del Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10 (AIS, 2010) permite el empleo de estructuras aisladas sísmicamente en su base, siempre y cuando se cumpla con la totalidad de los requisitos de alguno de los dos documentos siguientes:

- "NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings — Provisions and Commentary", 2003 Edition, Federal Emergency Management Agency, FEMA 450, Building Seismic Safety Council, National Institute of Buildings Sciences, Washington, D.C., USA, 2004.

- “Minimum Design Loads for Building and Other Structures”, ASCE/SEI 7-05, Structural Engineering Institute of the American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia, USA, 2006.

Para el diseño de estructuras aisladas, FEMA 450 (2003) establece que se deben implementar alguno de los siguientes análisis, según sea el caso: análisis de la Fuerza Horizontal Equivalente, para diseño preliminar; análisis dinámico espectral, para estructuras ubicadas en suelos tipo A, B, C o D; o análisis dinámico en el tiempo, para cualquier tipo de estructura.

Para diseñar una estructura aislada, y por ende los dispositivos de aislamiento, se debe realizar un proceso iterativo, en el cual, las características previamente obtenidas para los aisladores se ingresan al modelo computacional del edificio y se verifican las derivas, cortantes máximas. Además, se comprueba que las condiciones de diseño obtenidas correspondan con lo asumido inicialmente, tanto para el edificio como para los aisladores, solo en ese caso el diseño estaría completado, y no se requiere volver a iterar.

El proceso de diseño consta de quince etapas que se resumen en la Figura 1.

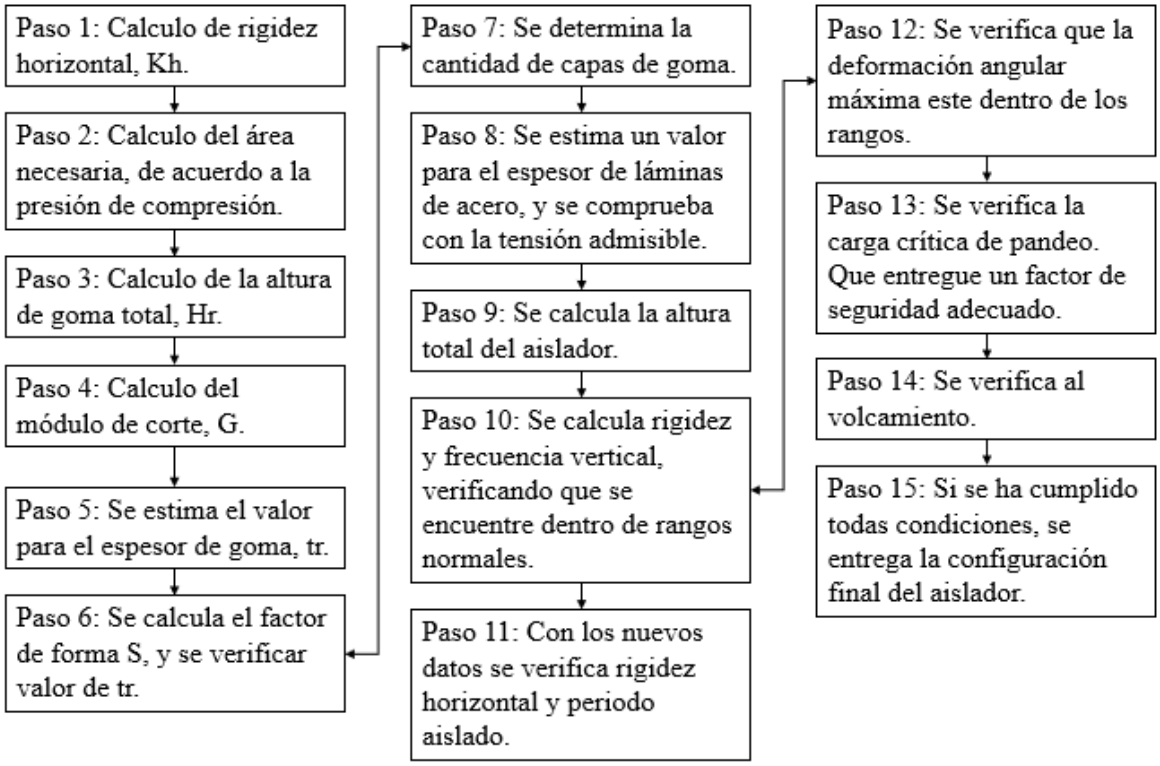


Figura 1. Diagrama de flujo de diseño del aislador HDR (Modificado de Arriagada Rosas (2005)*)*

Los datos de entrada más importante para empezar el proceso de diseño de los aisladores sísmicos corresponden a los desplazamientos, el periodo de diseño y el peso de la estructura en condición aislada, además de las características del caucho del aislador como el módulo de corte, amortiguamiento y deformación angular máxima (Madera-Sierra, 2018). Posteriormente, se determinan las propiedades mecánicas más importantes de rigidez horizontal (Ec. 2) y rigidez vertical (Ec. 3), y luego se continúa con el proceso de diseño (Kelly and Konstantinidis, 2011).

$$K_H = \frac{GA}{H_r} \quad \text{Ec. 2}$$

$$K_V = \frac{E_c^f A}{H_r} \quad \text{Ec. 3}$$

donde:

G es el módulo de corte,

A es el área total de la sección transversal del aislador,

H_r es la altura total del caucho

Ec^f es el módulo de compresión para el conjunto fibra-caucho.

Se siguió la metodología para estimar la rigidez de FREIs desconectados propuesta (Madera-Sierra, 2018) considerando la altura comprimida del aislador.

Según la ASCE 7-16 (2017), en su capítulo 17.2.8.4. *Property Modification Factors*, se deberán usar factores de modificación máximos y mínimos (λ) de propiedades para considerar la variabilidad de los parámetros ocasionado por efecto de la temperatura, el envejecimiento, la exposición ambiental y la contaminación. Los máximos y mínimos se determinan con base en la Ec. *4* y Ec. *5*, respectivamente.

$$\lambda_{max} = (1 + \left(0.75 * \left(\lambda_{ae,max} - 1\right)\right) * \lambda_{test,max} * \lambda_{spec.max} \geq 1.8 \quad \text{Ec. 4}$$

$$\lambda_{min} = (1 - \left(0.75 * \left(1 - \lambda_{ae,min}\right)\right) * \lambda_{test,min} * \lambda_{spec.min} \leq 0.6 \quad \text{Ec. 5}$$

donde:

$\lambda_{ae,max}, \lambda_{ae,min}$ = factor de modificación de propiedad para calcular el máximo y mínimo valor de la propiedad del aislador de interés, respectivamente, usado para tener en cuenta los efectos del envejecimiento y las condiciones ambientales.

$\lambda_{test,max}, \lambda_{test,min}$ = factor de modificación de propiedad para calcular el máximo y mínimo valor de la propiedad del aislador de interés, respectivamente, usado para tener en cuenta los efectos del calentamiento, velocidad de carga y raspado.

$\lambda_{spec,max}, \lambda_{spec,min}$ = factor de modificación de propiedad para calcular el máximo y mínimo valor de la propiedad del aislador de interés, respectivamente, usado para tener en cuenta los efectos de la variación en el proceso de manufactura.

Además, la ASCE 7-16 (2017) presenta unos valores de modificación por defecto cuando se desconoce el fabricante y no se dispone de los ensayos de calidad de los aisladores (Tabla 1).

Tabla 1. Límite superior e inferior por defecto para fabricantes desconocidos (Fuente: Tabla C17.2-6 ASCE 7-16)

	Valores máximos	Valores mínimos
Factor de envejecimiento y condiciones ambientales	$\lambda_{ae,max} = 1.4$	$\lambda_{ae,min} = 1.0$
Factor calentamiento, velocidad de carga y raspado	$\lambda_{test,max} = 1.5$	$\lambda_{test,min} = 0.9$
Factor variación manufactura	$\lambda_{spec,max} = 1.15$	$\lambda_{spec,min} = 0.85$

2.2.Antecedentes

En la historia reciente se ha popularizado el diseño y utilización de aisladores sísmico debido a su buen desempeño, que deriva en la reducción de daños en elementos estructurales. Sin embargo, la inminente necesidad de proteger a las estructuras de las ondas sísmicas también fue pensada en tiempos antiguos, y una de las primeras aplicaciones, llamada la Tumba de Ciro el Grande (Figura 2), se remonta al año 550 a.C., en Pasargadae, Persia; esta consistió en una estructura fundada en tres capas de piedras lisas sin mortero ni edificaciones colindantes para

permitir el libre movimiento de la estructura durante un sismo (Genatios and Lafuente, 2016). Otras estructuras antiguas con el mismo aislamiento de base denominado “Orthostat” son el Partenón, construido entre los años 447 a.C. y 432 a.C., y el Obelisco Dikilitash creado en el año 1450 a.C. (Bayraktar, Keypour and Naderzadeh, 2012; Genatios and Lafuente, 2016).

Figura 2. Tumba de Ciro el Grande (Tomado de https://es.wikipedia.org/wiki/Tumba_de_Ciro)

El paso de los años, marcado por el crecimiento poblacional, condujo a la construcción de grandes ciudades con edificios de elevada importancia como hospitales, colegios, centros comerciales o rascacielos, además de un compromiso por mantener niveles aceptables de seguridad (Escobedo, 2018). Es por esto que en la historia reciente, el correcto diseño de las edificaciones es de gran importancia para aumentar la resiliencia de las ciudades, es decir, la capacidad de reponerse con mayor facilidad después de un evento sísmico (Genatios and Lafuente, 2016; Escobedo, 2018).

La ocurrencia de diferentes sismos a nivel global ha permitido el avance de la Ingeniería Sísmica (Gómez Lera, Huerta Gómez de Merodio and Alarcón Álvarez, 1991), y dado lugar al desarrollo de tecnologías de protección, entre las que destaca el aislamiento sísmico.

Los aisladores sísmicos son dispositivos que desconectan la estructura de la cimentación, para disminuir las vibraciones en la edificación y evitar daños en elementos estructurales y no estructurales (Genatios and Lafuente, 2016). Aunque hay una gran variedad de aisladores sísmicos, estos se pueden clasificar en dos tipos. El primer tipo son los aisladores de deslizamiento que consisten en dos placas metálicas, una anclada a la estructura y la otra anclada a la cimentación,

con poca fricción para permitir el deslizamiento relativo entre ellas (Figura 3) (Genatios and Lafuente, 2016).

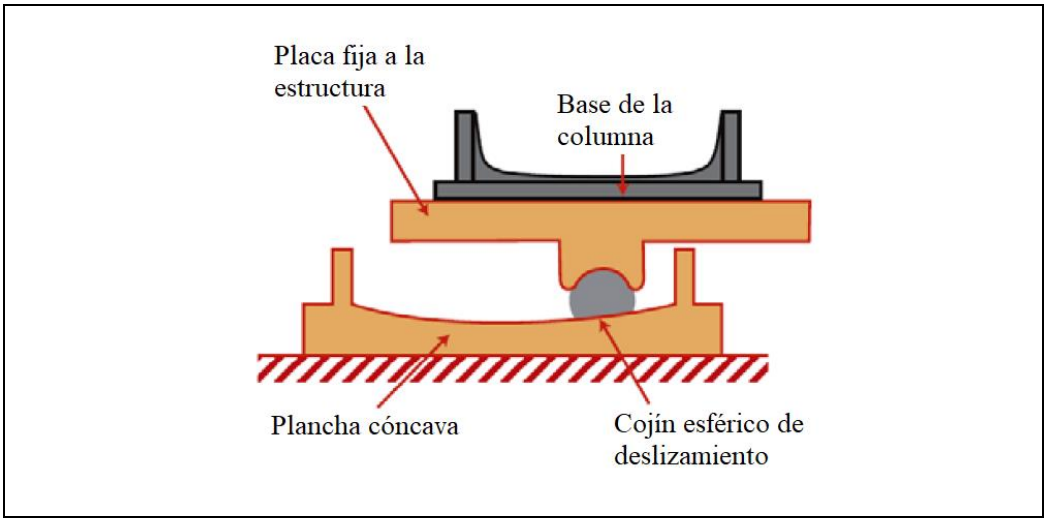


Figura 3. Esquema de aisladores de deslizamiento (Genatios and Lafuente, 2016)

El segundo tipo de dispositivos de aislamiento, y en los cuales se centra este proyecto de investigación, son los elastoméricos, que están hechos de un material como el caucho al cual deben su flexibilidad y amortiguamiento. La primera estructura aislada con elementos de caucho natural sin reforzamiento fue la Escuela Pestalozzi en Skopie, Macedonia, completada en el año 1969 (Makris, 2019). Posteriormente, se fabricaron aisladores elastoméricos reforzados con láminas de acero (SREIs) para aumentar la rigidez vertical del sistema (Figura 4.a.) (Makris, 2019). Para la década de 1970, Bill Robinson, miembro del Departamento de Investigación Científica e Industrial de Nueva Zelanda, propuso reemplazar los amortiguadores de acero por amortiguadores de plomo en el aislamiento de unas oficinas nuevas debido a sus excelentes propiedades y buen amortiguamiento (Robinson, 2011). Lo anterior dio paso a la creación de los SREIs con centro de plomo y conectados a la estructura, instalados por primera vez en 1981 en el edificio William Clayton en Wellington, Nueva Zelanda (Makris, 2019).

Por otra parte, debido a que el costo y el peso de los SREIs dificultaba la aplicación del aislamiento de base en edificios residenciales o comerciales, Kelly (1999) analizó las propiedades mecánicas de un aislador elastomérico reforzado con fibra (FREIs) y demostró que este igualaba el comportamiento de los SREIs, además de que se reducía significativamente el peso del sistema y se simplificaba el proceso de fabricación. Investigaciones posteriores revelaron que la relación de amortiguamiento de los FREIs es más de dos veces superior que la de los SREIs (Moon *et al.*,

2002; Kang and Kang, 2009). Otros estudios enfocados en las condiciones de conexión de los aisladores sísmicos, concluyeron que la rigidez horizontal de los aisladores elastoméricos reforzados con fibra y desconectados de la estructura (UN-FREIs) (Figura 4.b.) es considerablemente menor en comparación con los FREIs, disminuyendo las demandas de fuerza sísmica (Toopchi-Nezhad, Tait and Drysdale, 2008; Habieb, Milani and Tavio, 2018).

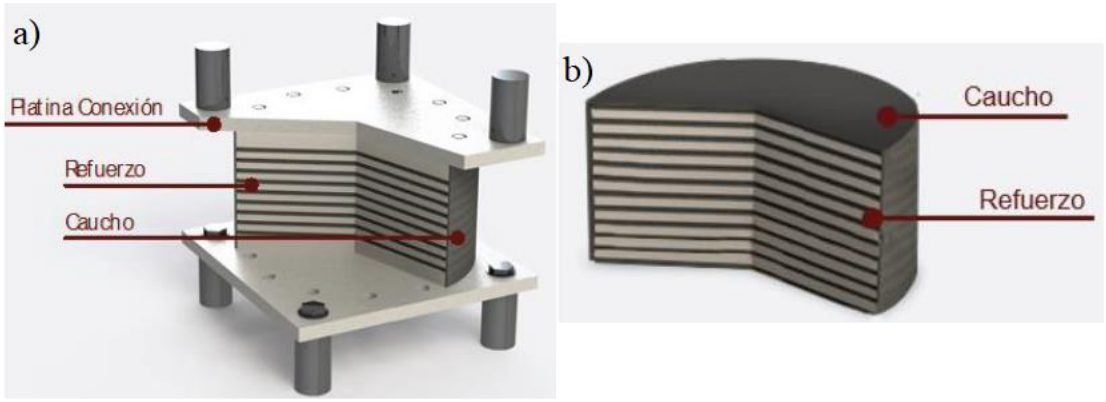


Figura 4. Tipos de aisladores elastoméricos a) SREI, y b) UN-FREI. (Madera-Sierra, 2018).

En el año 2018 se desarrollaron UN-FREIs en Colombia con caucho natural de alto amortiguamiento y fibra de poliéster para reducir los costos de fabricación e importación al ser utilizados en estructuras de baja altura, demostrando un buen rendimiento en comparación con los SREIs (Madera-Sierra, 2018; Losanno, De Domenico and Madera-Sierra, 2022).

Adicionalmente, otros autores utilizaron el caucho reciclado como materia prima en la fabricación de aisladores sísmicos y demostraron el alto potencial de estos dispositivos de bajo costo como aislamiento de base para edificios residenciales (Mishra, Igarashi and Matsushima, 2013; Spizzuoco, Calabrese and Serino, 2014; Calabrese *et al.*, 2019). En el caso de Colombia, investigaciones como la de Ortega Escobar (2021), evidencian que aunque los aisladores con material compuesto de caucho reciclado reforzados con fibra de poliéster y desconectados de la estructura (UR-FREIs) pueden aumentar el costo directo de la edificación, estos dispositivos reducen el riesgo de daño antes eventos sísmicos y disminuyen el costo de posibles reparaciones. Por todo lo anterior, los aisladores UN-FREIs y UR-FREIs se han denominado aisladores sísmicos de bajo costo, y serán objeto de estudio en este proyecto de investigación.

El efecto de agentes ambientales fue considerado en 1995 por la *American Association of State Highways and Transportation Officials* (AASHTO). La entidad conformó un grupo para definir

recomendaciones relacionadas con la temperatura, envejecimiento, contaminación, desgaste, velocidad de carga de los elementos, entre otros factores, lo cual representó una innovación en el diseño de dispositivos de aislamiento sísmico para el diseño de puentes (Genatios and Lafuente, 2016).

En lo que respecta a estudios realizados en aisladores previamente instalados, se encuentra el caso de la Escuela Pestalozzi en Skopie, Macedonia, aislada en la base con apoyos de caucho natural sin refuerzos, los cuales fueron reemplazados en el año 2008 después de 40 años de uso (Gjorgjiev and Garevski, 2012; M Kelly, 2018). Aunque los apoyos aún cumplían con los parámetros de diseño al momento de reemplazarlos, algunos elementos presentaban separaciones en las capas de caucho y grietas verticales (Gjorgjiev and Garevski, 2012), ocasionadas por la exposición a agentes ambientales como el ozono y las fuerzas de tensión generadas tras la compresión de los elementos con el paso de los años. Debido al riesgo de una reducción de las propiedades mecánicas por la propagación de las grietas, se consideró necesario reemplazar los dispositivos viejos por nuevos aisladores sísmicos de caucho natural de alto amortiguamiento reforzados con láminas de acero, producidos por una empresa local en Macedonia.

2.3.Estado del arte

En los últimos años se han incrementado los estudios que buscan analizar el comportamiento de diversos materiales frente a condiciones ambientales, para desarrollar materiales más duraderos y de mejor calidad. Lo anterior, también es un aspecto de interés para el diseño de aisladores sísmicos, debido a que estos elementos serán instalados en estructuras y su correcto funcionamiento con el paso del tiempo y al verse expuestos a agentes ambientales, permitirá aumentar la seguridad de estas durante toda su vida útil.

La importancia de los aislantes elastoméricos en la ingeniería antisísmica ha llevado a algunas investigaciones a centrarse en el análisis de la degradación de las propiedades mecánicas del caucho en condiciones ambientales específicas a lo largo del tiempo. (Gu, Itoh and Satoh, 2005; Gu and Itoh, 2010) desarrollaron pruebas para determinar la degradación del caucho natural y del caucho de alta amortiguación causada por factores como la oxidación térmica, lo rayos ultravioletas, el ozono, el ozono a baja temperatura, el agua salada y la lluvia ácida. Los autores concluyeron que la oxidación térmica a 70°C domina los procesos de envejecimiento, afectando a las prestaciones del caucho e influyendo negativamente en la respuesta sísmica de los puentes

aislados. Las investigaciones sobre el caucho natural han demostrado que la oxidación térmica genera un aumento de la rigidez (Itoh and Gu, 2009).

Por otro lado, la exposición a bajas temperaturas genera un efecto de cristalización en el caucho natural que podría disminuir la rigidez horizontal equivalente del material y el amortiguamiento durante un periodo de tiempo prolongado (Wang and Zhang, 2022). Otras investigaciones se han centrado en el desarrollo de aislantes sísmicos con caucho de neumático reciclado (Spizzuoco, Calabrese and Serino, 2014; Calabrese *et al.*, 2015; Ortega Escobar, 2021), pero hasta ahora solo (Losanno *et al.*, 2022) han realizado ensayos de envejecimiento en probetas de caucho de neumático reciclado, concluyendo que la rigidez horizontal aumenta tras seis semanas de envejecimiento. En el caso de los aisladores sísmicos de bajo costo en Colombia, los UN-FREI y UR-FREI solo han sido ensayados en condiciones normales de operación, por lo que se deben realizar estudios para caracterizar el comportamiento de los compuestos de caucho en procesos de degradación natural, con el fin de establecer los parámetros de diseño y los cuidados que se deben tener para evitar daños a lo largo de su vida útil.

3. DESARROLLO EXPERIMENTAL

En esta investigación, se analizaron dos tipos de materiales utilizados para fabricar UFREIs de bajo costo: i) un caucho natural de alta amortiguación (UN-FREI) (Madera Sierra *et al.*, 2019), desarrollado en colaboración con la empresa Surtidor Industrial S.A.; y ii) un compuesto de partículas de caucho recicladas de neumáticos, producido por la empresa Occidental de Cauchos y unido con un aglutinante de poliuretano (UR-FREI), financiado por un proyecto de investigación de la Pontificia Universidad Javeriana Cali (PUJC) (Ortega *et al.*, 2023). Se fabricaron probetas con cada mezcla de acuerdo con la norma aplicable y se realizaron prototipos a pequeña escala considerando las condiciones de diseño de un edificio objetivo (Losanno *et al.*, 2019).

3.1.Exposición a condiciones ambientales

Se consideró la exposición a humedad relativa, radiación UV, agua salada y CO2, sin embargo, la condición predominante en el ambiente será la humedad relativa y CO2, por lo tanto, estás dos condiciones se evaluaron en los prototipos a escala reducida para obtener los factores de modificación de las propiedades ($\lambda_{ae,max}$ y $\lambda_{ae,min}$) y aplicarlos en la modelación de la estructura tipo. La cámara de carbonatación acelerada está ubicada en la Universidad de Purdue, por lo cual, los ensayos con CO2 solo se realizaron sobre los prototipos a escala reducida.

3.1.1. Humedad relativa (HR)

Las diferentes muestras se colocaron en una cámara climática WEISS (Figura 5.a) de los laboratorios del Departamento de Ingeniería Civil de la Pontificia Universidad Javeriana Bogotá (PUJB) bajo condiciones de 85% de humedad relativa (HR) y 25°C, tomando como referencia lugares con alta HR y ubicados en una zona de alta amenaza sísmica, como el departamento del Chocó (Colombia). Con el fin de monitorear el cambio en la masa, las muestras y los prototipos se pesaron periódicamente en una balanza de precisión de 0.1mg y 0.1g, respectivamente.

El porcentaje de agua fue determinado como el porcentaje de la masa ganada (Ec. 6);

$$\Delta M_t(\%) = \frac{m_t - m_0}{m_0} * 100\% \qquad \textit{Ec. 6}$$

donde mt es la masa de la muestra después del tiempo t, y m_0 es la masa inicial de la muestra. El cambio de masa se midió utilizando tres muestras por cada día evaluado. El tiempo máximo de exposición fue de 30 días.

3.1.2. Radiación UV

La radiación UV se llevó a cabo mediante el uso de una cámara de envejecimiento acelerado con lámparas de luz negra UVA de longitud de onda de 340 nm y una intensidad de irradiación de 13 W/m² a 40°C en PUJB (Figura 5.b.). Debido a la irradiancia, la intensidad disminuye con el uso de lámparas (Heikkilä *et al.*, 2009), se seleccionó un período de exposición corto para obtener una radiación UV homogénea. Teniendo en cuenta que en otros estudios (Cambier and Frankel, 2014; Shimizu *et al.*, 2016) los polímeros evaluados han mostrado degradación incluso después de unas pocas horas de exposición, las muestras fueron retiradas de la cámara después de 5 y 9 días.

3.1.3. Agua salada

La exposición a ambientes marinos ha sido ampliamente investigada en concreto (Alyami *et al.*, 2019) y polímeros (Le Gac *et al.*, 2012).; por lo tanto, se incluyó la inmersión en agua salada y el secado del material, simulando el cambio en estas condiciones, y la inclusión de sales en la estructura del material. Zonas de amenaza sísmica alta como el Chocó, están ubicados en zonas costeras, donde el deterioro por el contacto con agua salada afectar el desempeño del dispositivo como sucede con los apoyos elastoméricos en puentes de zonas costeras (Ma *et al.*, 2019). Durante los primeros 5 días, las muestras, correspondientes a cada ensayo mecánico, se sumergieron en una solución de sulfato de sodio al 5%. Posteriormente, se secaron en horno a 40°C durante 7 días (Figura 5.c.), y se repitió la inmersión durante otros 4 días, completando un total de 16 días de tiempo de exposición. Las pruebas mecánicas se realizaron al final de cada etapa, en los laboratorios de la PUJC.

3.1.4. Carbonatación acelerada (CO_2)

En cuanto al mecanismo de difusión de agentes corrosivos en el hormigón, como el CO2, varios autores han propuesto ecuaciones para describir la carbonatación en este material, a pesar de la complejidad del proceso de difusión. Teniendo en cuenta que la concentración de CO2 en la atmósfera es relativamente baja (400 ppm o 0,04%), se han desarrollado ensayos de carbonatación

acelerada con un porcentaje establecido de CO2, como 1%, 3%, 10%, 20% e incluso 100% (Auroy *et al.*, 2018; Shah and Bishnoi, 2018; Van den Heede, Thiel and De Belie, 2020; Liu *et al.*, 2023).

En este estudio, los prototipos a pequeña escala fueron expuestos durante 10 días en una cámara de carbonatación acelerada (Figura 5.d.) en los Laboratorios de Materiales Pankow de la Escuela de Ingeniería Civil Lyles (Universidad de Purdue) con 20% de CO2; después de ese tiempo, se extrajeron para pruebas mecánicas.

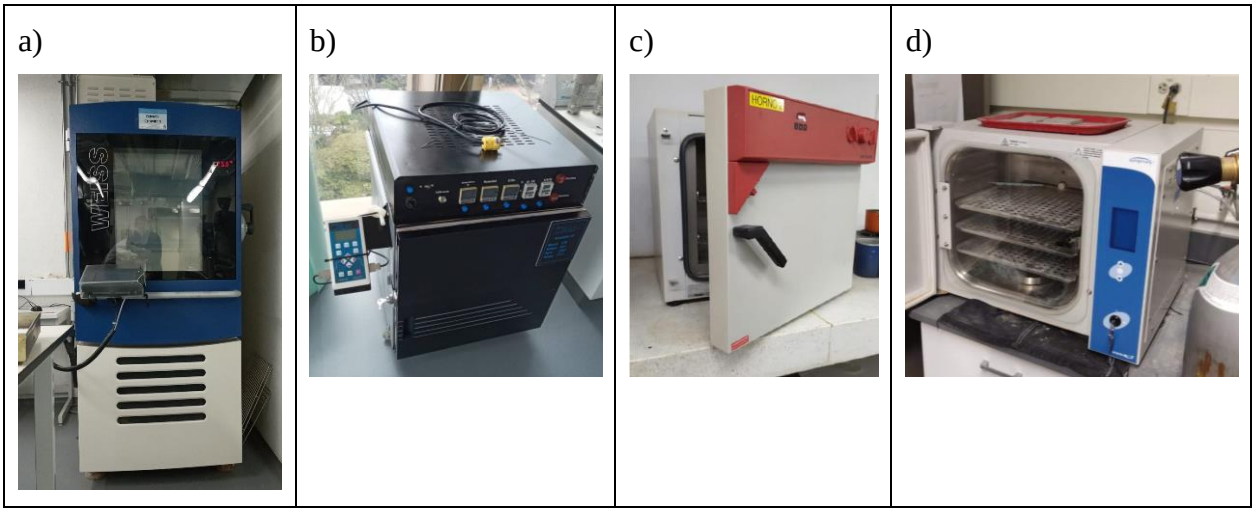


Figura 5. Exposición a condiciones ambientales: a) cámara climática para HR, b) cámara de radiación UV y c) horno para secado de agua salada y d) cámara de carbonatación acelerada

3.2.Caracterización mecánica de probetas

Inicialmente se fabricaron las mezclas de caucho natural y caucho reciclado en las empresas Surtidor Industrial y Occidental de Cauchos, respectivamente. Los componentes, concentraciones y tiempos de ejecución de la mezcla de caucho natural son producto de la tesis doctoral de la Ingeniera Civil Ingrid Madera (2018), mientras que para el caso de la mezcla de caucho reciclado el proceso fue desarrollado en la tesis de maestría de la Ingeniera Civil Lizeth Ortega (2021) como resultado del proyecto de Convocatoria Interna Modalidad (2019) de la PUJ Cali.

Se siguió la metodología de ensayo de la ASTM D412-16 (2021) para determinar la fuerza máxima de tracción. Las probetas fueron sujetas por las mordazas de una máquina de tracción universal Instron de los laboratorios de la PUJB equipada con una celda de carga de 50 kN (Figura 6.a.). Las muestras UN-FREI y UR-FREI se ensayaron a una velocidad de 500 mm/min y 50 mm/min, respectivamente. La menor velocidad permitió lograr una mayor elongación de las probetas UR-FREI antes de la falla (Ortega Escobar, 2021).

Las probetas se fabricaron de acuerdo con la ASTM D575-91 (2018) para la determinación del esfuerzo de compresión utilizando una máquina de compresión universal Instron de los laboratorios PUJB (Figura 6.b.). Se implementaron tres ciclos sucesivos de carga y descarga, con una velocidad de deformación de 12 mm/min. Los dos primeros ciclos alcanzaron el 50% de deformación vertical para el acondicionamiento de la muestra. En el tercer ciclo, se registró la carga requerida para lograr una deformación vertical del 70% de la probeta.

Se adoptó la ASTM D395-18 (2018) para determinar la deformación de una probeta sometida a un esfuerzo de compresión constante (Figura 6.c.). Antes de la prueba, se tomó la altura de las muestras y se colocaron en un horno a 70°C durante 22 horas. El límite de deformación de las probetas de ambos materiales durante el ensayo fue de aproximadamente el 25% de la altura inicial. Después del horno, se retiró el conjunto y se volvió a medir la altura 30 minutos después de salir del horno. A continuación, se calculó el porcentaje de la deformación inicial (CB) (Ec. 7), donde CB es el conjunto de compresión expresado como porcentaje de la deflexión original, t_0 es el espesor original de la muestra, t_i es el espesor final de la muestra y t_n es el espesor del separador utilizado.

$$C_B = \frac{(t_0 - t_i)}{(t_0 - t_n)} x100 \qquad \textit{Ec. 7}$$

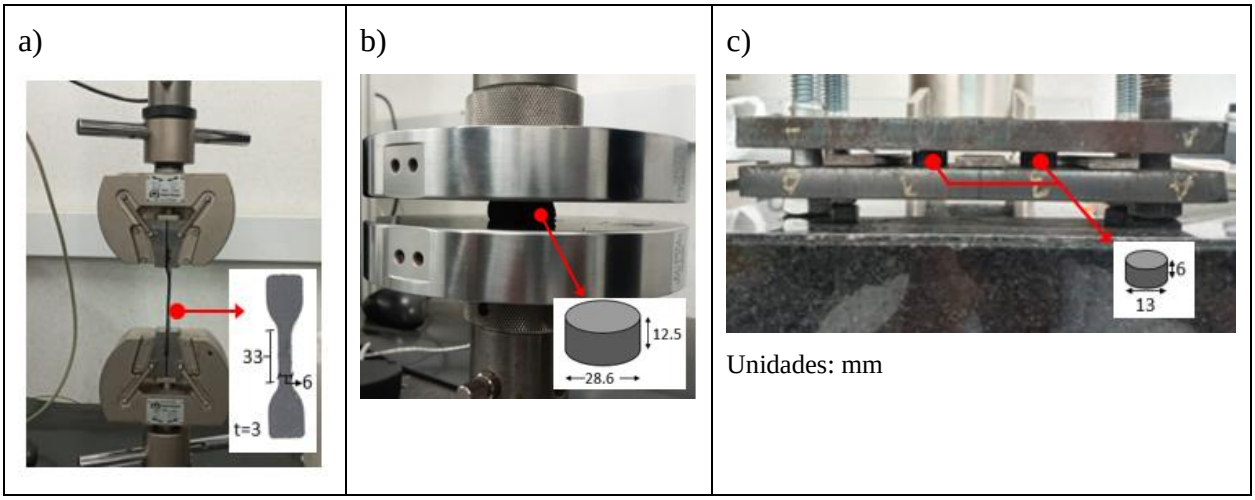


Figura 6. Probetas para ensayos de: a) tensión, b) compresión monotónica y c) compresión residual

Se utilizaron dos tipos diferentes de conjuntos para determinar el módulo de corte y la relación de amortiguamiento de cada material con la prueba de cortante cíclica. Para UN-FREI, se utilizó el conjunto que se muestra en la Figura 7.a. Los bloques tenían un espesor aproximado de 8,6 mm y un ancho de sección transversal rectangular de 29,5 mm y una longitud de 38,4 mm. Para el montaje de las probetas UR-FREI (Figura 7.b.), se fabricaron probetas cilíndricas con un diámetro de 28,6 mm y una altura de 12,5 mm y posteriormente se colocaron en el conjunto, ejerciendo un esfuerzo de compresión sobre ellas para evitar su deslizamiento. Las pruebas se realizaron en una máquina de pruebas hidráulicas universales MTS en PUJB y una máquina de pruebas universales Instron en PUJC, utilizando un período de 5s y 9s, respectivamente, debido a las capacidades de cada máquina, y considerando que el módulo de corte y la relación de amortiguamiento de UN-FREI no dependen del período de aplicación de la carga (Madera Sierra *et al.*, 2019); por lo tanto, con el fin de comparar los dos materiales, ambos períodos se aplicaron también a UR-FREI. La metodología empleada fue la propuesta en ATC-17 (2002) y ASTM D4014-03 (2018). Las deformaciones del material fueron del 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 75%, 100% y 150%, y se aplicaron diez ciclos en cada nivel de deformación. Sin embargo, a pesar de que se ejecutó el protocolo completo, los resultados se presentan para una deformación del 30% debido a que los especímenes de UR-FREI se dañaron a deformaciones más altas.

a)

b)

Figura 7. Probetas para el ensayo de cortante cíclica: a) UN-FREI y b) UR-FREI.

3.3.Caracterización mecánica de prototipos a escala reducida

Las dimensiones de los prototipos a pequeña escala se determinaron de acuerdo con la metodología implementada por (Losanno *et al.*, 2019, 2020), para ambos materiales. La estructura usada consistió en cuatro columnas con un peso aplicado de 19,25 kN en cada una. El período de diseño a escala de la estructura aislada fue de 1,15 s, con una vida nominal de 100 años, y se utilizaron siete registros sísmicos representativos de las regiones de Italia. Las dimensiones resultantes del diseño de los prototipos a escala se muestran en la Figura 8.

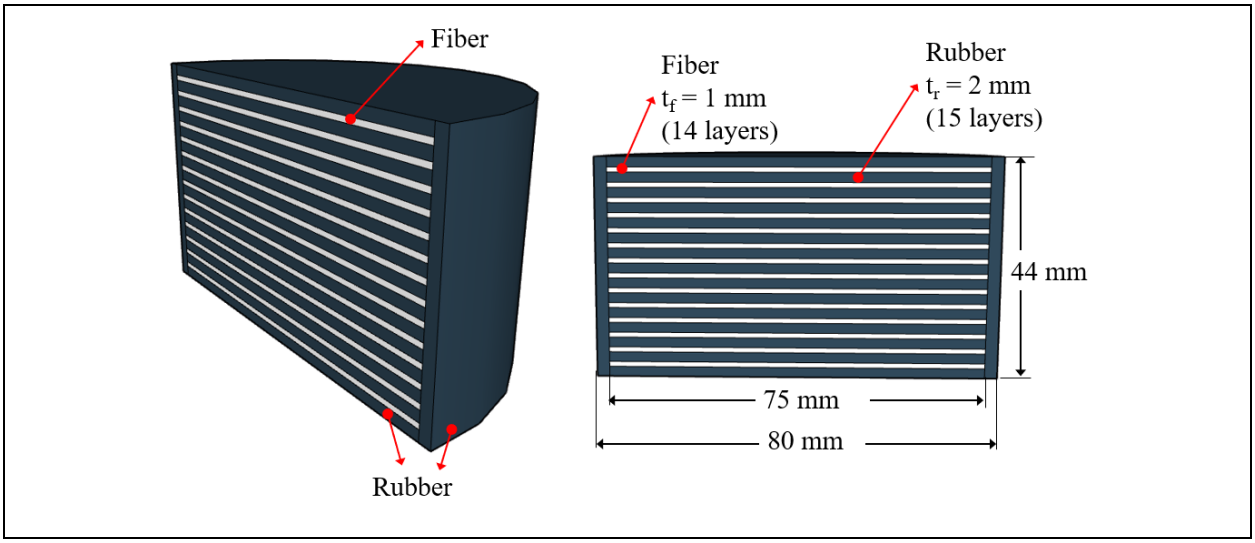


Figura 8. Dimensiones de los prototipos a escala reducida de UN-FREI y UR-FREI (Losanno *et al.*, 2019)

Se realizaron dos pruebas en los prototipos. Para el primer ensayo de compresión a cortante, se aplicó un protocolo de desplazamiento horizontal siguiendo las recomendaciones de Madera-Sierra (2018) (Figura 9.a.). Se realizaron seis niveles de deformación correspondientes al 25%, 50%, 67%, 100%, 100% y 75% de la deformación máxima elegida de 29 mm para los prototipos, con un periodo de 1,15s (Figura 10.a.). La prueba se llevó a cabo en el Laboratorio de Sistemas de Infraestructura Inteligente (IISL) de la Universidad de Purdue.

El segundo ensayo de compresión cíclica se desarrolló en tres partes para medir los desplazamientos generados con una carga de compresión variable (Figura 9.b.). En primer lugar, se aplicó una carga de compresión a 0,01 mm/s hasta alcanzar la carga de diseño de 19 kN. Luego, se aplicaron tres ciclos consecutivos hasta alcanzar el ±30% de la carga de diseño a una velocidad de 0.05 mm/s. Finalmente, la carga de compresión se retiró por completo a una velocidad de 0,01 mm/s (Figura 10.b.). La prueba se llevó a cabo en los laboratorios de la PUJB.

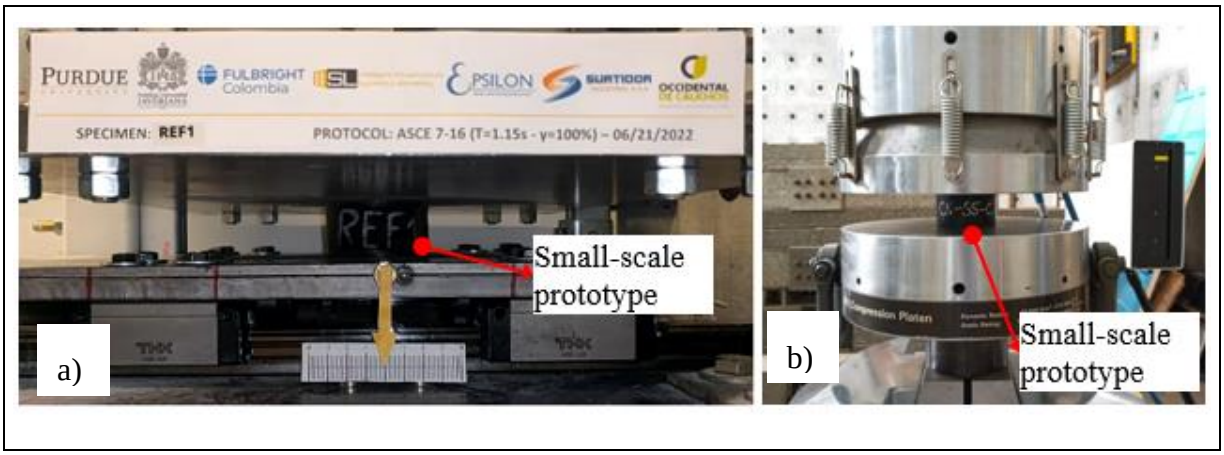


Figura 9. a) ensayo de corte-compresión y b) ensayo de compresión cíclica

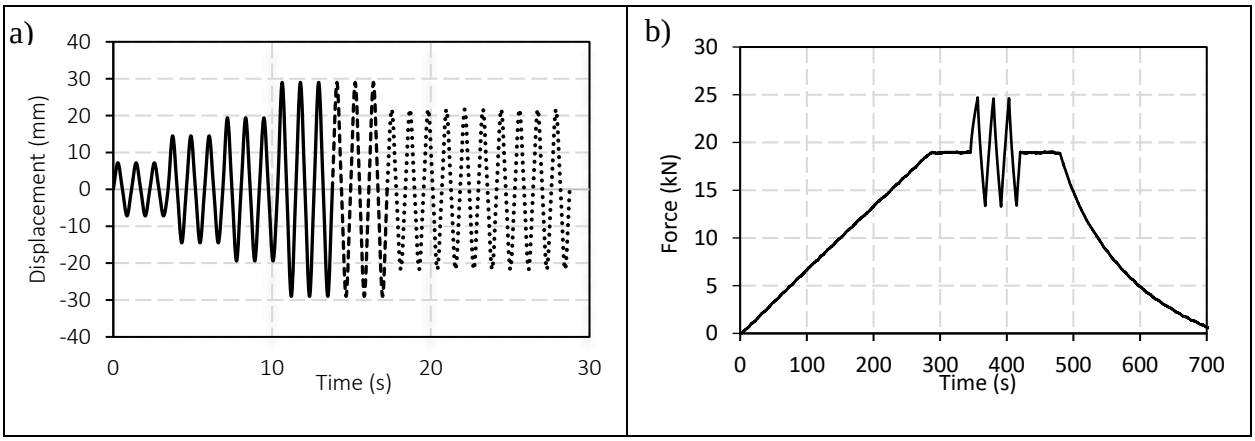


Figura 10. Protocolos de carga: a) ensayo de corte-compresión y b) ensayo de corte-compresión

3.4.Características de las edificaciones tipo

Se tomó como estructura residencial tipo para los aisladores de caucho natural y reciclado la estructura presentada por (Madera-Sierra, 2018)

Con los resultados de los ensayos mecánicos hechos a prototipos a escala reducida, se modificaron las propiedades de rigidez horizontal, rigidez vertical y amortiguamiento de los aisladores modelados según era el caso. Finalmente, se analizó la respuesta sísmica de la edificación tipo con aisladores sísmicos sin exposición comparada con aisladores sísmicos bajo efectos de condiciones ambientales para el desplazamiento máximo total (D_{TM}).

Se debe resaltar que actualmente en Colombia no se cuenta con una reglamentación específica para el diseño de aisladores sísmicos, por lo cual, se siguieron las recomendaciones establecidas por (Madera-Sierra, 2018) en el diseño de los aisladores elastoméricos reforzados con fibra desconectados de la estructura (UFREIs) para el cálculo de la rigidez vertical, que incluyen consideraciones de la NSR 10 (AIS, 2010), FEMA 450 (2003) y otros autores ahí referenciados. En la Figura 11 y Tabla 2 se presentan las características generales de esta estructura sin considerar los factores de modificación de propiedades por condiciones ambientales ($\lambda_{ae,max}$ y $\lambda_{ae,min}$). Este edificio aislado fue usado para modelar el efecto del cambio de las propiedades de los UN-FREI y UR-FREI, para comparar la respuesta de la edificación.

La ASCE 7-16 (ASCE, 2017) permite realizar un análisis espectral siempre que se cumplan ciertas condiciones: la estructura aislada debe estar localizada en un suelo de tipo A, B, C o D; el período efectivo en el desplazamiento máximo no debe exceder los 5.0 segundos; la altura desde el nivel de base debe ser inferior a 19.8 m; el amortiguamiento asociado al desplazamiento máximo debe ser menor o igual al 30%; y la estructura no debe presentar irregularidades en planta ni en altura. Dado que la estructura analizada cumple con estos criterios, se seleccionó el espectro de diseño correspondiente a la Zona 2 de la microzonificación sísmica de la ciudad de Cali, ajustado para un tipo de suelo D. Las aceleraciones fueron multiplicadas por un factor de 1.5 para considerar un período de retorno de 2475 años (Figura 11). El análisis estructural se llevó a cabo utilizando el software ETABS, desarrollado por Computers and Structures, Inc. (CSI). Para el cálculo de las fuerzas sísmicas, se definió una fuente de masa compuesta por el 100% de la carga muerta y el 50% de la carga viva.

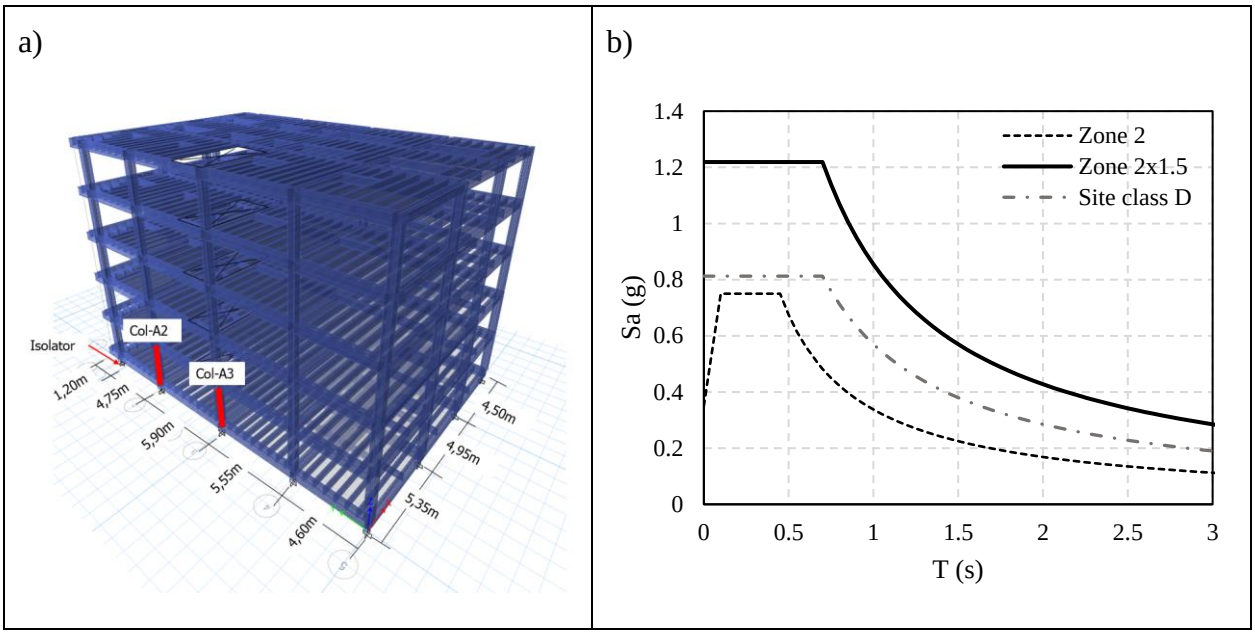


Figura 11. Características de la estructura tipo analizada: a) 3D y b) espectro de respuesta

Tabla 2. Características generales de la estructura tipo analizada

Concreto (MPa) (f'c)	24
Acero (MPa) (fy)	420
Columnas	45x45 cm
Vigas	35x40 cm, 40x50 cm
Números de pisos	5
Altura de piso (m)	3
Número de aisladores	20 aisladores
Peso de la estructura	19633.25 kN
Carga muerta (kN/m^2)	5.0
Carga vida (kN/m^2)	1.8
Periodo de diseño	2.5 s
Amortiguamiento horizontal (γ=160%)	6.10%

El diseño completo y el proceso iterativo se encuentran en el Anexo 1. En la Figura 12 se observa la geometría de los aisladores UN-FREI y UR-FREI. En la Tabla 3 se presenta un resumen de las propiedades finales para D_{TM}.

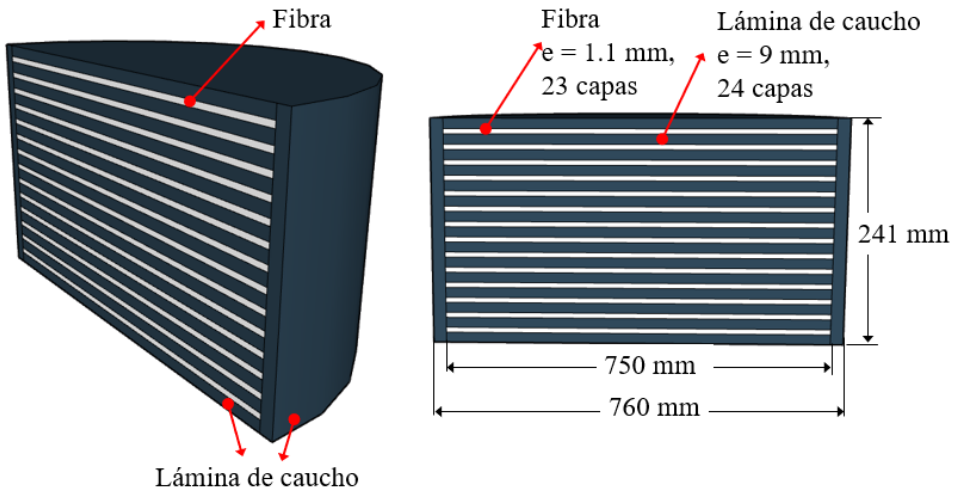


Figura 12. Dimensiones de aislador sísmico para edificación tipo

Tabla 3. Características generales del aislador sísmico

Espesor capas de caucho (mm)	tr	9.0
Número de capas	n	24
Espesor fibra de poliéster (mm)	tf	1.1
Espesor total del caucho (mm)	Hr	216.0
Espesor total del aislador (mm)	H	241.3
Diámetro del aislador (mm)	D	750
Desplazamiento total máximo (m)	D_{TM}	0.345
Periodo objetivo (s)	T_D	2.5
Densidad de la fibra (kg/m^3)	γ_{fibra}	1000
Densidad del caucho (kg/m^3)	γ_{caucho}	1200
Masa del aislador (kg)	Mais	125
Peso del aislador (N)	Wais	1233
Características desplazamiento vertical U1		
Rigidez efectiva (N/m)	Kv	146303417.6
Amortiguamiento efectivo (N*s/m)	Cv	76525.09105
Características desplazamiento horizontal U2=U3		
Rigidez efectiva (N/m)	Keff	850121.57
Amortiguamiento efectivo (N*s/m)	Ch	41266.82
Rigidez elástica (N/m)	Ke	2151572.72
Esfuerzo de fluencia (N)	fy	46473.97
Relación de rigidez post fluencia	Kp/Ke	0.3547

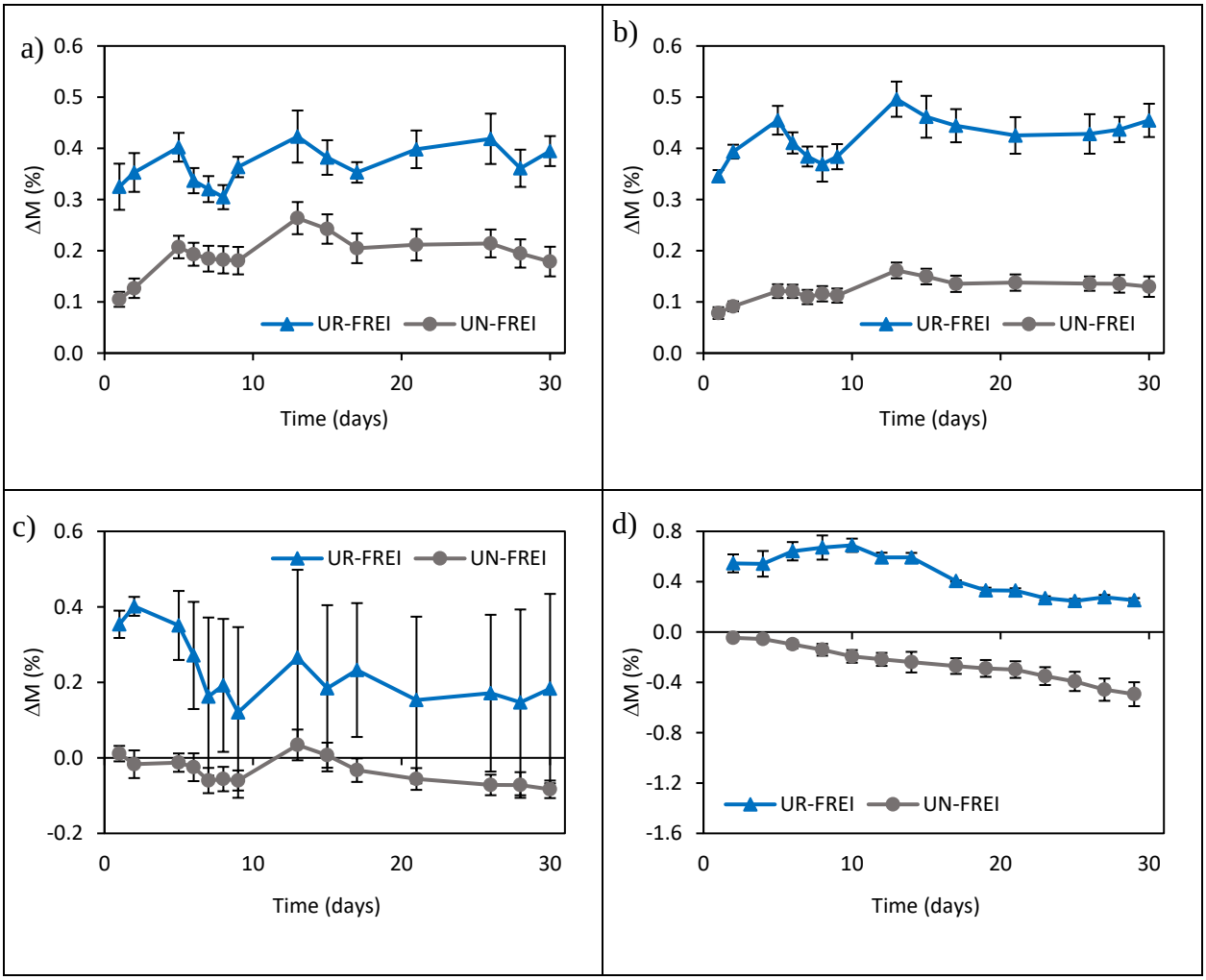
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las muestras de UN-FREI y UR-FREI fueron expuestas a diferentes condiciones ambientales y los resultados fueron comparados con muestras de referencias llamadas REF.

4.1. Caracterización mecánica de probetas

4.1.1. Humedad relativa (RH)

La Figura 13 presenta las curvas de ganancia de masa en función de los días de exposición al 85% de HR para las muestras fabricadas. En general, las probetas UR-FREI presentaron una mayor ganancia de masa en comparación con las UN-FREI desde el inicio hasta el final de la exposición. La porosidad del compuesto de caucho reciclado puede estar directamente relacionada con la capacidad de absorción de agua del material.



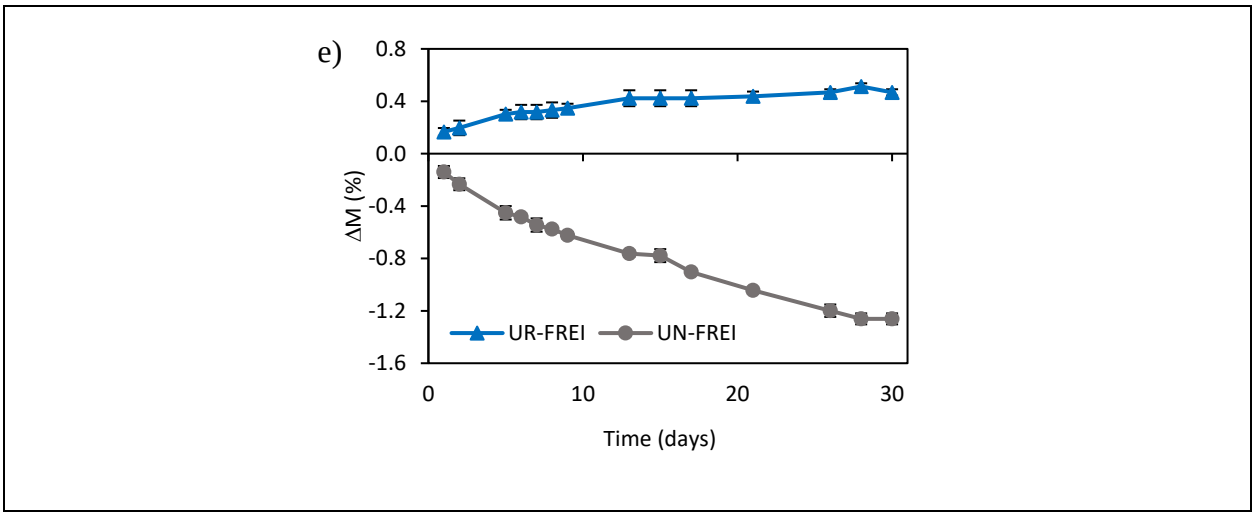


Figura 13. Curvas de masa ganada a lo largo del periodo según el tipo de probeta: a) tensión, b) compresión monotónica, c) compresión residual, d) prototipos de corte compresión y e) prototipos de compresión cíclica.

Por otra parte, los resultados muestran que la estabilización de la ganancia de masa durante la exposición depende del tamaño y la forma de las probetas. Mientras que en las probetas de tracción (Figura 13.a.) y compresión (Figura 13.b.) se alcanza una estabilización a los 20 días, en los prototipos (Figura 13.d. y Figura 13.e.) no se mantiene esta tendencia. Además, los resultados del ensayo de compresión residual exhibieron mayor dispersión en el material de caucho reciclado (Figura 13.c.), siendo las muestras de menor tamaño evaluadas. En el caso de los prototipos, las muestras de mayor tamaño analizadas (Figura 13.d y Figura 13.e), se produjo una ganancia de masa en las de UR-FREI, como era de esperar, pero las UN-FREI perdieron masa a lo largo del periodo de exposición. Procesos como la hidrólisis podrían provocar la ruptura de enlaces químicos que permiten la liberación de sustancias y, en consecuencia, una disminución de la masa del material (Pickett and Coyle, 2013).

El esfuerzo de tensión de las probetas UN-FREI y UR-FREI se muestra en la Figura 14.a. para deformaciones del 500% y el 7%, respectivamente. Las probetas UN-FREI se ensayaron hasta el desplazamiento máximo de la máquina de ensayos utilizada; sin embargo, las probetas no alcanzaron el fallo, mientras que todas las probetas UR-FREI fallaron aproximadamente al 7% de su longitud inicial. En general, la resistencia a la tracción de UR-FREI es inferior a la de UN-FREI en todos los casos evaluados. Para las probetas de referencia, UR-FREI sólo alcanzó el 6,4% de la resistencia a la tracción de UN-FREI. Esto se debe a que las partículas de caucho reciclado presentan baja cohesión entre ellas, facilitando el fallo temprano del material.

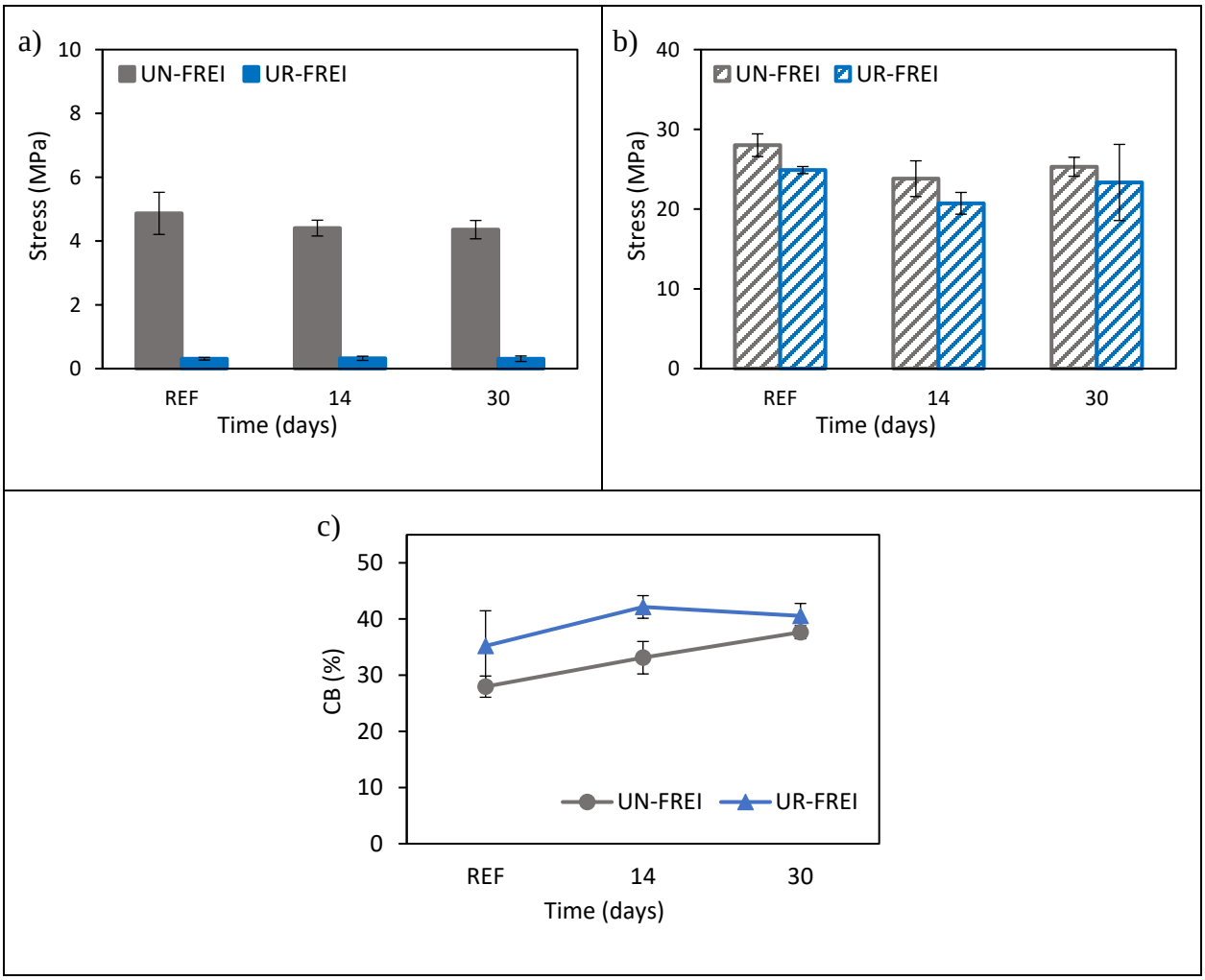


Figura 14. Resultados de humedad relativa para: a) tensión, b) compresión monotónica y c) compresión residual

La condición de HR provocó una reducción de la resistencia a la tracción de las probetas UN-FREI del 9,50% y del 10,48% a los 14 y 30 días, respectivamente, lo que demuestra que, con el aumento del tiempo de exposición, la pérdida de resistencia aumenta ligeramente. La exposición a una HR elevada puede aumentar la fragilidad de los polímeros en comparación con una HR baja, ya que la absorción de agua afecta a los enlaces químicos y debilita la estructura del polímero (Pickett and Coyle, 2013). En las muestras UR-FREI, a los 14 días se produjo un aumento del 4,02% y a los 30 días una reducción del 0,09% de la resistencia, por lo que no hay evidencia del efecto de la HR, posiblemente debido a la baja cohesión de las partículas de caucho reciclado.

La Figura 14.b muestra el esfuerzo de compresión necesario para alcanzar una deformación del 70% de la altura inicial de las probetas UN-FREI y UR-FREI. En general, las probetas UR-FREI, con mayor absorción de agua y mayor porosidad debido a la estructura heterogénea de la

muestra de caucho reciclado (Figura 13.b.), presentaron menor resistencia que las probetas UN-FREI. Las probetas UN-FREI expuestas a HR presentaron un 15,00% y un 9,67% menos de resistencia a compresión que el valor de referencia a los 14 y 30 días, respectivamente, mientras que las muestras UR-FREI mostraron una disminución de la resistencia del 16,72% y del 6,23%, respectivamente, lo que demuestra que la exposición a HR genera una pérdida de rigidez vertical en los materiales, lo que contrasta con los resultados de tracción.

Por último, el conjunto de compresión de las probetas UN-FREI y UR-FREI se presenta en la Figura 14.c. Para ambos materiales, la HR generó un aumento de la deformación permanente del material. Para UN-FREI, la deformación aumentó en 18,42% y 34,63%, mientras que para UR-FREI, fue de 19,74% y 15,25% a los 14 y 30 días de exposición, respectivamente. El compuesto de caucho reciclado mostró una mayor deformación bajo largos periodos de carga aplicada.

En cuanto al ensayo de cortante cíclica, para determinar el módulo de corte G (Figura 15.a.) y la relación de amortiguamiento β (Figura 15.b.), la toma de datos se limitó al 30% de deformación debido al comportamiento inestable de las probetas UR-FREI que se dañaron a deformaciones superiores. El ensayo se realizó con un periodo de 5s.

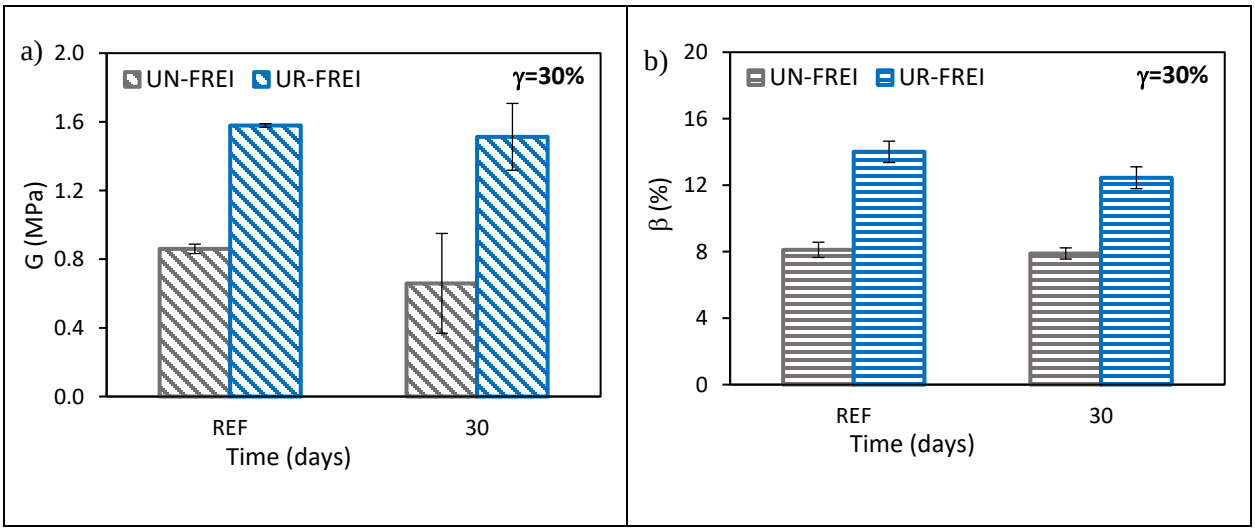


Figura 15. Resultados de humedad relativa para cortante cíclica: a) módulo de corte (G) y b) razón de amortiguamiento (β)

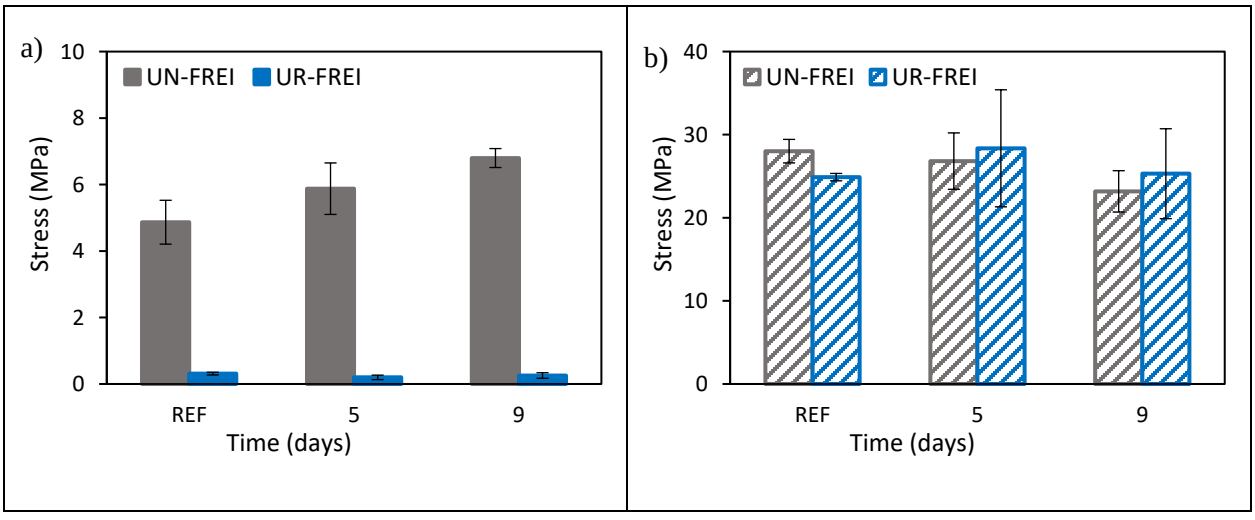
En general, el módulo de corte y la razón de amortiguamiento de UR-FREI fueron superiores a los de UN-FREI, similar a lo presentado por (Losanno *et al.*, 2022). Se observó que la exposición a HR durante 30 días influyó en la pérdida de rigidez de los materiales, lo cual es comparable con los resultados de tensión y compresión. La HR generó una disminución del módulo de corte para

las probetas UN-FREI y UR-FREI del 23,38% y 4,17%, respectivamente (Figura 15.a). Del mismo modo, se presentó una reducción del amortiguamiento del 2,67% para UN-FREI y del 11,14% para UR-FREI en las mismas condiciones de ensayo (Figura 15.b.).

4.1.2. Radiación UV

La Figura 16.a. presenta la resistencia a la tensión de las probetas UN-FREI y UR-FREI expuestas a la radiación UV para deformaciones del 500% y el 7%, respectivamente. La radiación UV generó un aumento de la resistencia a la tracción de UN-FREI del 20,70% a los 5 días y del 39,65% a los 9 días de exposición. La formación de nuevos enlaces podría aumentar la rigidez y la resistencia a la deformación inicial, pero también podría hacer que el caucho fuera menos elástico y reducir su capacidad para soportar altas tensiones antes de la rotura (Itoh and Gu, 2007; Gu and Itoh, 2010). Por otra parte, a los 9 días de exposición, las muestras UR-FREI mostraron una resistencia a la tracción un 18,27% inferior al valor de referencia.

El esfuerzo de compresión al 70% de deformación de las probetas UN-FREI y UR-FREI se muestra en la Figura 16.b. Al contrario de lo que ocurrió con la exposición a HR, las probetas UR-FREI presentaron valores más altos que las probetas UN-FREI con radiación UV. Las probetas UN-FREI presentaron una disminución de la resistencia del 4,28% y del 17,26% a los 5 y 9 días, respectivamente. Por el contrario, a los 5 y 9 días de exposición, las muestras UR-FREI mostraron un aumento de la resistencia a la compresión del 13,93% y del 1,65%, respectivamente. En general, a los 9 días de exposición, ambos materiales experimentaron un descenso de la resistencia presentada en los primeros días de radiación UV.



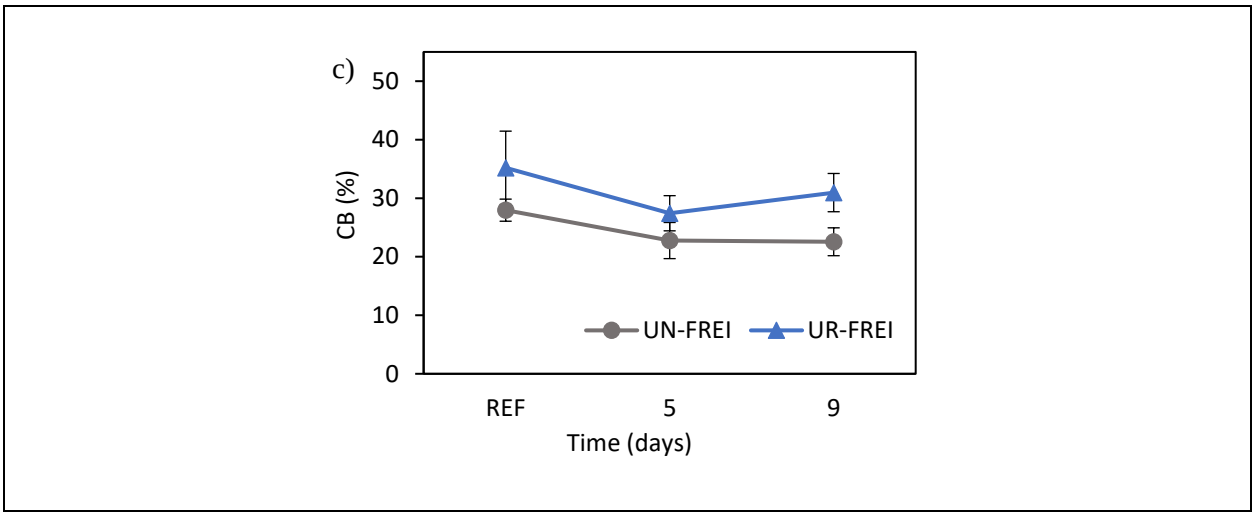


Figura 16. Resultados de radiación UV para: a) tensión, b) compresión monotónica y c) compresión residual.

El conjunto de compresión residual de las probetas UN-FREI y UR-FREI se muestra en la Figura 16.c. Los rayos UV generaron una reducción en la deformación de ambos materiales. Para UN-FREI fue de 18,58% y 19,33%, mientras que para UR-FREI fue de 22,07% y 12,04%, a los 5 y 9 días de exposición, respectivamente.

El ensayo de cortante cíclica se realizó con un periodo de 5s. En las muestras UN-FREI, el módulo de corte permaneció constante a los 5 días de exposición UV, pero disminuyó un 17,88% a los 9 días del ensayo. Mientras que en las muestras UR-FREI, se produjo un aumento del módulo de corte del 5,62% a los 5 días, y una ligera disminución del 1,03% a los 9 días (Figura 17.a.). En cuanto a la razón de amortiguamiento (Figura 17.b.), a los 9 días de exposición, se generó un aumento de la relación de amortiguamiento del 8,83% en la UN-FREI y una disminución del 1,80% en la UR-FREI.

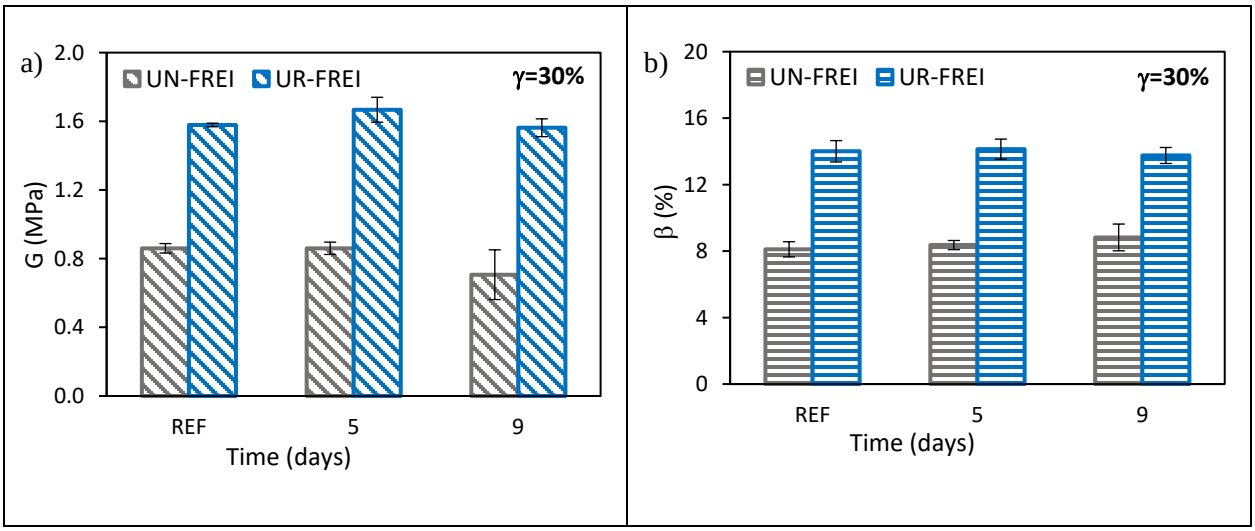


Figura 17. Resultados de radiación UV para cortante cíclica: a) módulo de corte (G) y b) razón de amortiguamiento ratio (β).

4.1.3. Agua salada

En la Figura 18.a. se muestran los valores de resistencia a la tensión de las probetas UN-FREI y UR-FREI expuestas a la acción del agua salada para deformaciones del 500% y el 7%, respectivamente. Los primeros días de inmersión de las probetas UN-FREI provocaron una disminución de la resistencia a la tracción del 0,92% (día 5), seguida de un aumento de la resistencia del 22,82% relacionado con el proceso de secado (día 12) y, por último, con la inmersión adicional de las probetas en agua salada, la ganancia de resistencia se redujo al 7,09% (día 16). Esto indica que el proceso de secado genera un aumento de la rigidez al 500% de deformación, relacionado con la temperatura de ensayo, mientras que la inmersión en agua salada disminuye la resistencia a la tracción, ya que el material se vuelve más flexible debido a la presencia de agua. En el caso de UR-FREI, se presenta el comportamiento opuesto a UN-FREI. La inmersión inicial generó un aumento de la resistencia a la tracción del 48,56% (día 5), seguido de una disminución de la ganancia de resistencia del 3,69% relacionada con el proceso de secado (día 12) y, finalmente, con la re-inmersión la ganancia de resistencia se redujo al 12,93% (día 16). En general, los ciclos de inmersión en sal y secado podrían aumentar la resistencia a la tracción del material incrementando el número de ciclos a lo largo del tiempo, pero se reduciría la capacidad de deformación (Ma *et al.*, 2019).

La Figura 18.b muestra el esfuerzo de compresión necesario para alcanzar una deformación del 70% de las probetas UN-FREI y UR-FREI. Contrariamente a los valores de compresión de las

muestras expuestas al agua salada, las muestras UR-FREI mostraron una mayor resistencia que las muestras UN-FREI. Las probetas UN-FREI expuestas al agua salada presentaron una pérdida de resistencia del 34,38%, 41,56% y 41,05% a los 5, 12 y 16 días de ensayo. Por otro lado, los valores de resistencia de UR-FREI mostraron un comportamiento creciente, pasando de una pérdida del 14,23% a una ganancia del 8,39% a los días 5 y 16, respectivamente.

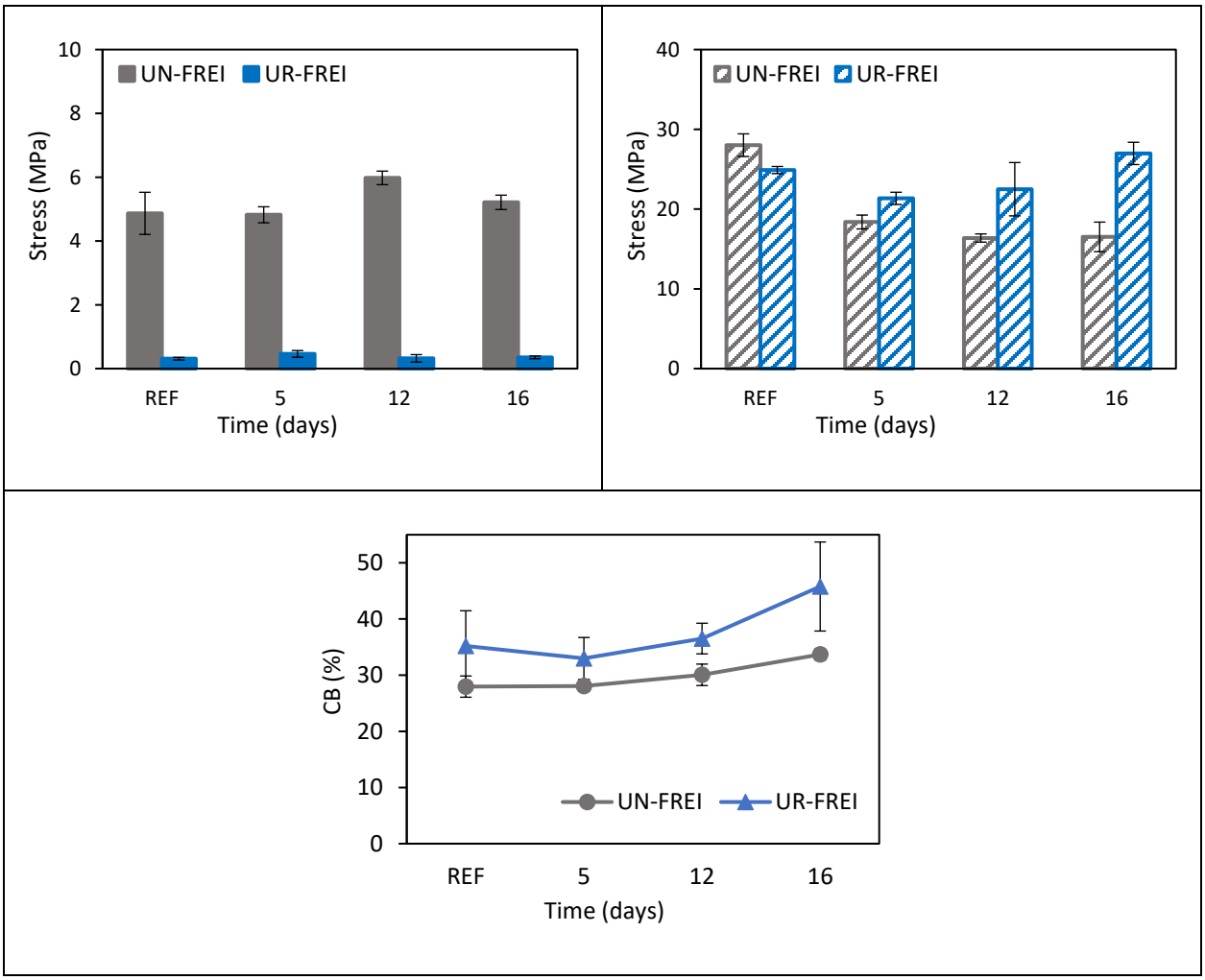


Figura 18. Resultados de exposición a agua salada para ensayos de: a) tensión, b) compresión monotónica y c) compresión residual

En cuanto a la compresión residual (Figura 18.c.), la exposición al agua salada aumentó la deformación de las probetas UN-FREI y UR-FREI, alcanzando un CB de 34% y 46% al final de la exposición, respectivamente.

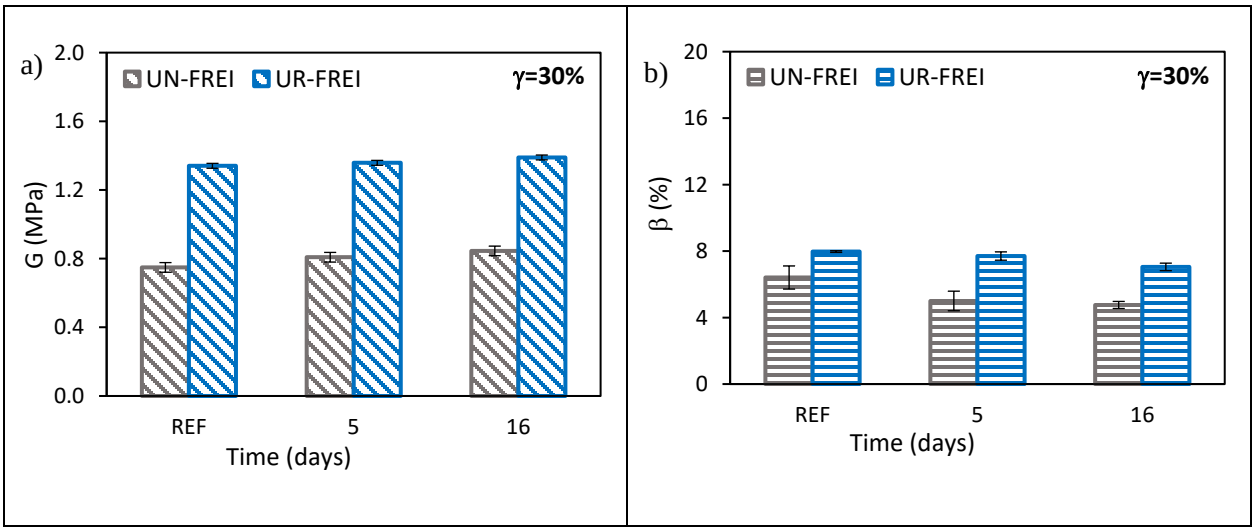


Figura 19. Resultados de exposición a agua salada para el ensayo de compresión cíclica: a) módulo de corte (G), and b) razón de amortiguamiento (β)

El ensayo de cortante cíclica se realizó con un periodo de 9 s debido a la capacidad de la máquina del laboratorio utilizado. Con el aumento de la exposición al agua salada, el módulo de corte aumentó 12,84% y 3,62% en la UN-FREI y UR-FREI, respectivamente, a los 16 días de exposición (Figura 19.a).

En cuanto a la relación de amortiguamiento, es evidente que el aumento del período de ensayo disminuyó la relación de amortiguamiento de ambos materiales evaluados con respecto a la exposición a la HR y a la radiación UV que fueron ejecutadas con un período de 5s. Para una deformación del 30%, la diferencia entre el amortiguamiento de las muestras de referencia a 5 y 9 s fue del 21%. (FEMA 450, 2003) especifica una diferencia máxima del 15% en las propiedades para probar la independencia del comportamiento del caucho con el periodo de ensayo; por lo tanto, en las condiciones de este estudio, el valor está ligeramente por encima.

Este comportamiento es similar al reportado por (Madera Sierra *et al.*, 2019), quienes concluyeron que a medida que aumentaba el periodo de ensayo, la relación de amortiguamiento disminuía hasta un máximo de 8%. Al aumentar la exposición al agua salada, la relación de amortiguamiento disminuyó en un 25,77% y 11,57% en el UN-FREI y UR-FREI, respectivamente (Figura 19.b.) en comparación con el valor de referencia.

4.1.4. Resumen de resultados de probetas

Para evaluar los resultados encontrados al exponer los materiales estudiados a las condiciones ambientales consideradas, se definieron cuatro rangos, tomando como valor crítico 20% de cambio

en las propiedades considerando las expuestas en ASCE 7-16 (2017), en su capítulo 17.8.4. Test Specimen Adequacy, donde se permite hasta un 20% de cambio en la rigidez efectiva de los prototipos ensayados.

Inicialmente, los resultados de cada día de exposición se compararon con los valores de referencia. A continuación, para cada tipo de exposición y cada ensayo, se seleccionaron los valores con mayor cambio, independientemente de la duración del ensayo. De este modo, se estableció la nomenclatura de la Tabla 4.

Tabla 4. Criterio de evaluación

Rango (%)		Estado	Incremento	Reducción
0	5	Leve	~↑	~↓
5	10	Moderado	↑	↓
10	20	Grave	↑↑	↓↓
20	50	Crítico	↑↑↑	↓↓↓

Los criterios de la Tabla 5Tabla 4 se aplicaron a los resultados de las muestras y se presentan en la Tabla 5. En general, se observa que en el UN-FREI, más propiedades se encontraban en el rango crítico, mientras que en el UR-FREI, un mayor número de propiedades se encontraban en el rango grave. El comportamiento de UR-FREI podría deberse a que es un material más rígido y heterogéneo con partículas unidas por un aglomerante, lo que lo hace menos susceptible a experimentar cambio en sus propiedades en las condiciones evaluadas.

Tabla 5. Evaluación de resultados de probetas de UN-FREI y UR-FREI

	UN-FREI					UR-FREI				
*Exposición	T	C	C.S.	G	β	T	C	C.S.	G	β
RH	↓↓	↓↓	↑↑↑	↓↓↓	~↓	~↑	↓↓	↑↑	~↓	↓↓
UV	↑↑↑	↓↓	↓↓	↓↓	↑	↓↓↓	↑↑	↓↓↓	↑	~↓
SW	↑↑↑	↓↓↓	↑↑↑	↑↑	↓↓↓	↑↑↑	↓↓	↑↑↑	~↑	↓↓

*T - tensión, C – comprensión monotónica, CS - compresión residual, G – módulo de corte, β - razón de amortiguamiento

Un módulo de corte elevado generará un aumento en la rigidez del aislador, lo que a su vez ocasiona un menor periodo y mayores aceleraciones que pueden aumentar las derivas y cortantes

en la edificación. Además, un mayor amortiguamiento permite reducir las aceleraciones consideradas en el espectro de respuesta (Barmo, Mualla and Hasan, 2015).

4.2.Caracterización mecánica de prototipos a escala reducida

4.2.1. Ensayo de corte compresión

El ensayo de corte compresión se desarrolló sobre prototipos a pequeña escala con dos tipos de exposición disponibles en los Laboratorios de Materiales Pankow: i) un ambiente con un 20% de CO2 durante 10 días, seguido de un ambiente con un 85% de HR durante otros 7 días; en cada caso, se ensayaron tres prototipos de cada material; la nomenclatura utilizada fue CO2 y CO2+RH, respectivamente; y ii) un ambiente con un 85% de HR constante; se ensayaron tres prototipos de cada material a los 14 y 31 días; la nomenclatura utilizada fue RH-14d y RH-31d. El protocolo de carga (Figura 10.a.) también se aplicó a prototipos de referencia denominados REF. La Figura 20 resume los resultados obtenidos para el amortiguamiento en función de los desplazamientos horizontales y de cada tipo de exposición. Para el caso UR-FREI, los valores de amortiguamiento y rigidez se limitaron al 50% de deformación debido a la falta de flexibilidad de los prototipos para deformarse más allá de ese nivel.

En general, el amortiguamiento UN-FREI disminuyó al aumentar la deformación de corte hasta el 67%, pero luego el amortiguamiento aumentó al alcanzar el 100% y 75% de deformación en ambos tipos de exposición (Figura 20.a y Figura 20.b). En cuanto al efecto de las condiciones ambientales evaluadas, la mayor diferencia con el valor de referencia se presenta con la exposición a CO2, con un 3,43% y 3,63% de pérdida de amortiguamiento al 67% y 75% de deformación. Mientras que la combinación de CO2+RH generó menos del 1% de diferencia con el valor de referencia (Figura 20.a).

Por otro lado, la exposición a HR constante generó un aumento del amortiguamiento en casi todos los niveles de deformación en UN-FREI, ocurriendo la mayor ganancia cuando las muestras fueron expuestas durante 31 días, con un aumento del amortiguamiento del 2,12% y 2,60% al 67% y 75% de deformación (Figura 20.b).

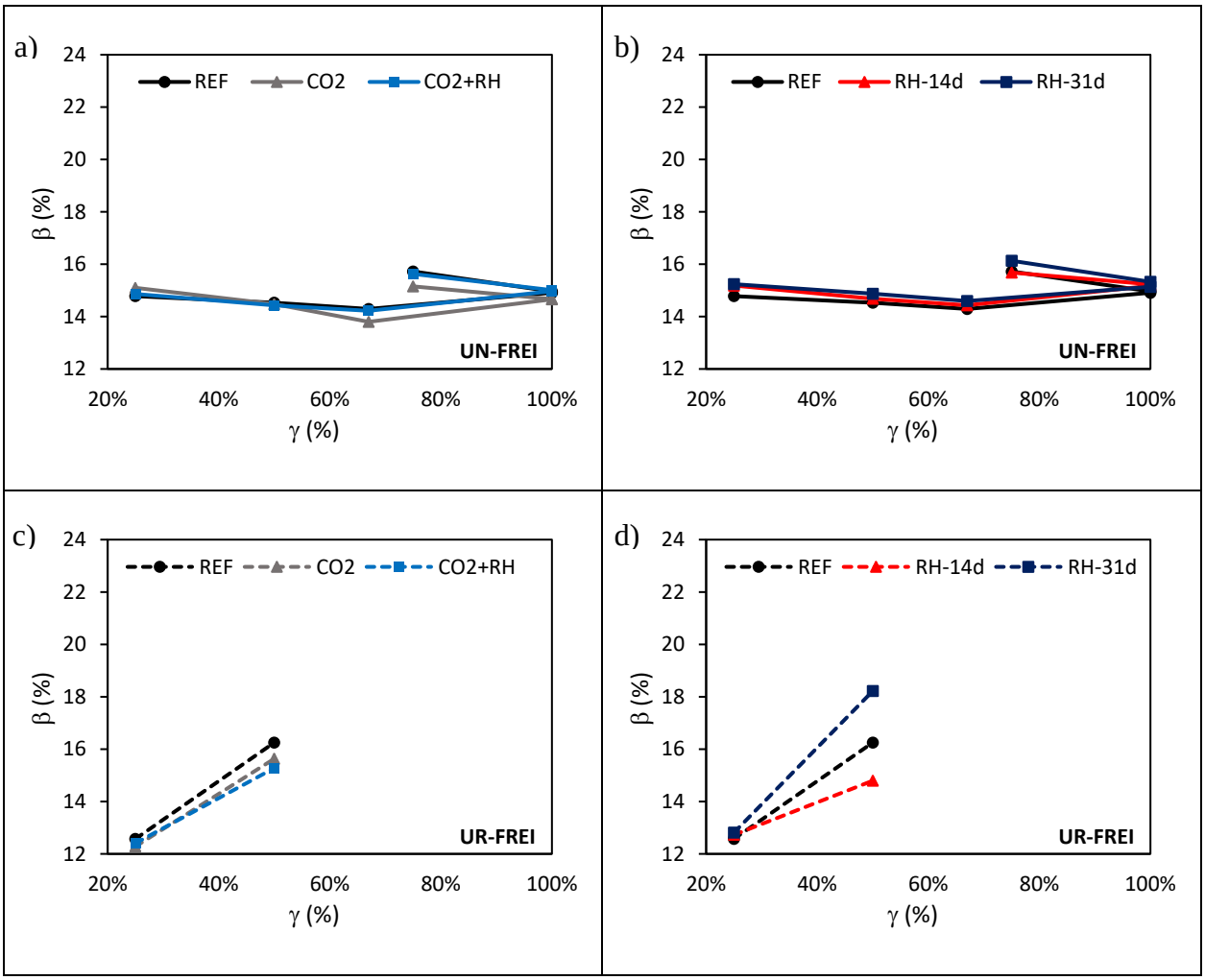


Figura 20. Amortiguamiento (β) vs deformación de corte (γ): a) CO2+RH UN-FREI, b) HR contante UN-FREI, c) CO2+RH UR-FREI, and d) HR constante UR-FREI

Contrariamente al comportamiento de UN-FREI, el valor de amortiguamiento de UR-FREI aumentó con el incremento de los niveles de deformación en todos los casos evaluados. Sin embargo, la exposición a CO2 y CO2+RH influyó en la pérdida de amortiguamiento al 50% de deformación, teniendo un 3,80% y 5,99% menos de amortiguamiento que el valor de referencia, respectivamente (Figura 20.c).

La exposición a HR constante generó una disminución del amortiguamiento del 8,96% a los 14 días, seguida de un aumento del 12,12% a los 31 días al 50% de deformación. Aunque ambos materiales presentaron un mayor amortiguamiento a los 31 días de HR constante, hubo una diferencia a los 14 días, ya que mientras el amortiguamiento aumentó en UN-FREI, disminuyó en UR-FREI (Figura 20.d).

La Figura 21 muestra los resultados obtenidos para la rigidez horizontal en función de los desplazamientos horizontales y de cada tipo de exposición.

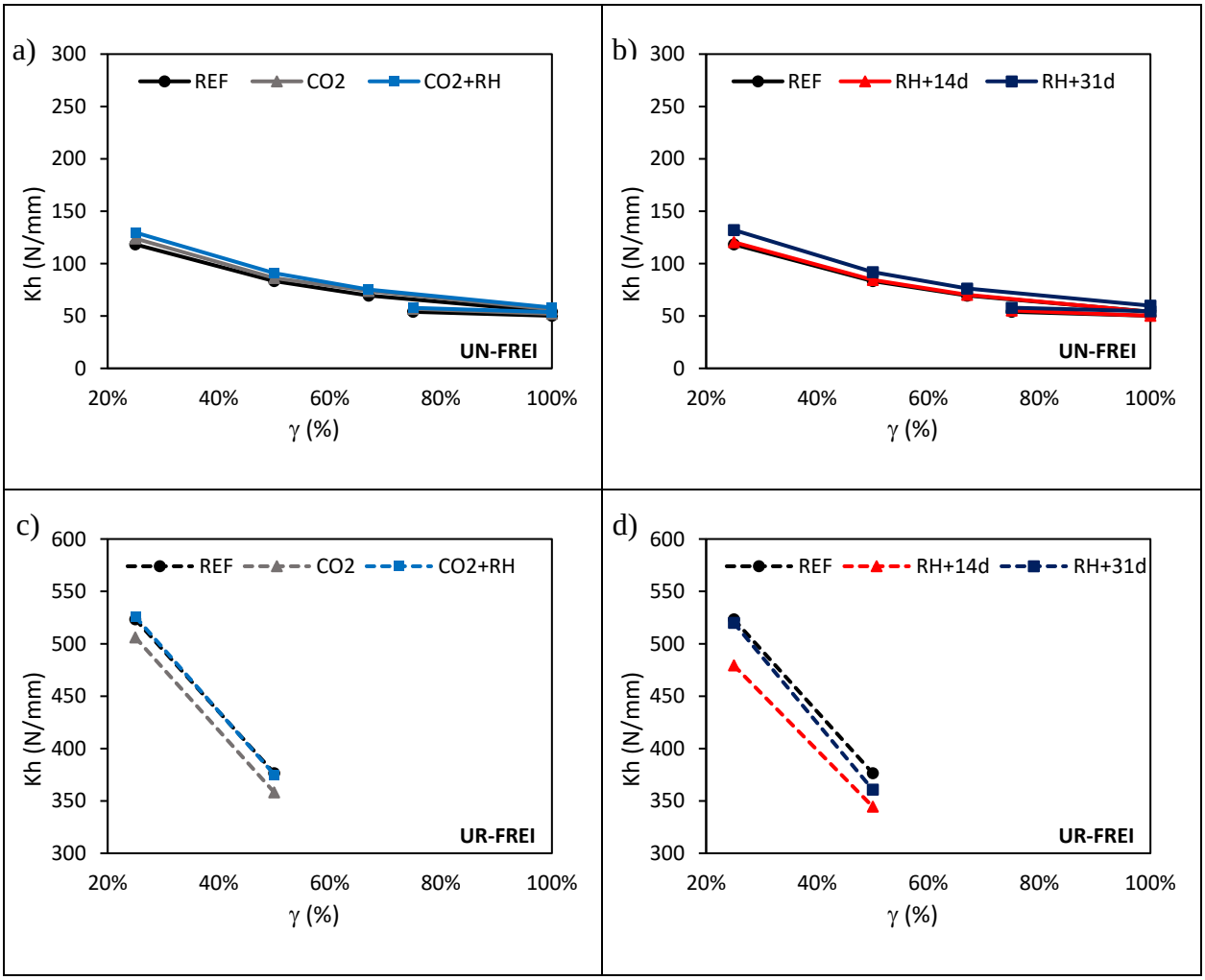


Figura 21. Rigidez horizontal (Kh) vs deformación de corte (γ): a) CO_2+RH UN-FREI, b) HR constante UN-FREI, c) CO_2+RH UR-FREI, y d) HR constante UR-FREI.

La rigidez horizontal de UN-FREI disminuyó al aumentar la deformación por cortante en ambos tipos de exposición (Figura 21.a. y Figura 21.b.). Entre las condiciones ambientales evaluadas, todas generaron un aumento de la rigidez en comparación con el valor de referencia, excepto la HR a los 14 días, con una ligera pérdida de rigidez del 0,42% a una deformación del 100% (Figura 21.b.). La mayor ganancia se produjo a los 31 días de HR, con un 10,60% y un 7,22% al 100% y al 75% de deformación, respectivamente.

De forma similar al comportamiento de UN-FREI, la rigidez horizontal disminuyó con el aumento del nivel de deformación de UR-FREI, pero con respecto al valor de referencia, la rigidez

disminuyó bajo las condiciones ambientales evaluadas con la excepción de la combinación CO2+RH, con una ligera ganancia de rigidez del 0,50% al 25% de deformación (Figura 21.c.). La exposición a HR durante 14 días generó una reducción de la rigidez del 8,40% y 8,49% al 25% y 50% de deformación.

4.2.2. Ensayo de compresión cíclica

El ensayo de compresión cíclica se desarrolló sobre prototipos con 85% de HR, con el fin de completar la caracterización de esta condición ambiental tan común en Colombia. En cada caso se ensayaron dos prototipos por cada material. Debido a que después de 20 días, se observó una tendencia a un comportamiento constante en la UR-FREI de la Figura 13.d y Figura 7.e, se consideró un período de exposición de 23 días, y la nomenclatura utilizada fue RH-23d. El protocolo de carga (Figura 10.b.) también se aplicó a los prototipos de referencia denominados REF.

La Figura 22 resume los valores de rigidez vertical obtenidos para los prototipos a pequeña escala UN-FREI y UR-FREI.

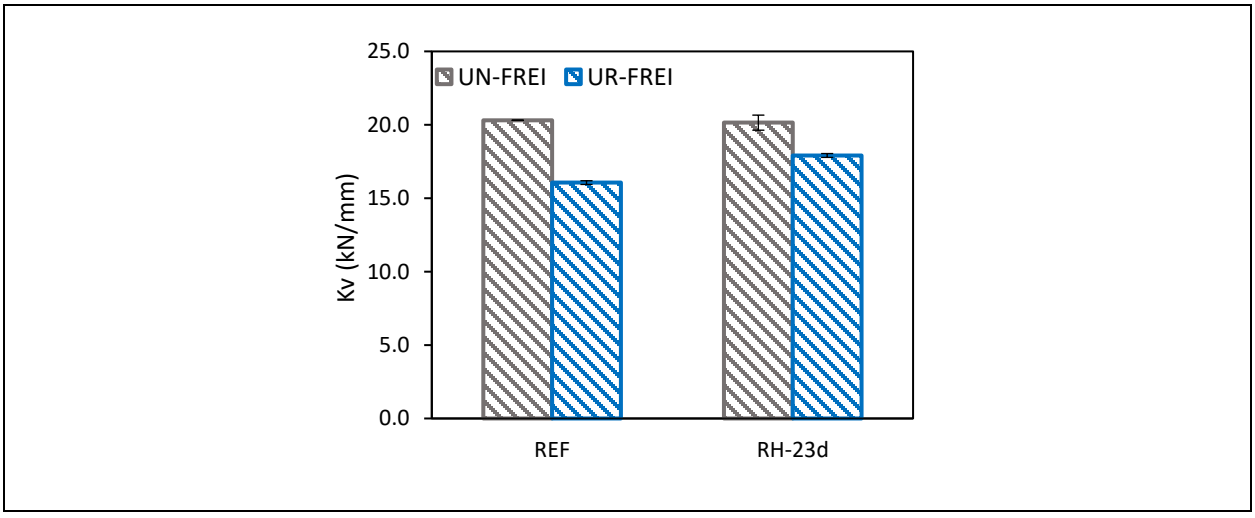


Figura 22. Rigidez vertical (Kv) de UN-FREI y UR-FREI a 23 días de exposición a RH.

Mientras que para los prototipos UN-FREI se necesitaron 20,31 kN para deformar 1 mm, para los prototipos UR-FREI se necesitaron 16,06 kN para deformar la misma cantidad (Figura 22). Esto se debe posiblemente a que el compuesto de caucho reciclado es una mezcla heterogénea con un mayor número de poros en su estructura, lo que reduce la resistencia a la compresión del material. Por otro lado, la exposición a HR durante 23 días generó una reducción del 0,79% y un

aumento del 11,50% en el UN-FREI y UR-FREI, respectivamente, en la rigidez vertical de las muestras evaluadas.

4.2.3. Resumen de los resultados de los prototipos a pequeña escala

Los criterios de la Tabla 4 se utilizaron para evaluar los resultados obtenidos al exponer los prototipos a pequeña escala a las condiciones ambientales consideradas (Tabla 6).

Tabla 6. Evaluación de los resultados de los prototipos a escala reducida de UN-FREI y UR-FREI

	UN-FREI			UR-FREI		
*Exposición	Kh	β	Kv	Kh	β	Kv
CO2	↑	~↓		~↓	~↓	
CO2+RH	↑	~↓		~↑	↓	
RH-14d	~↑	~↑		↓	↓	
RH-31d	↑↑	~↑		~↓	↑↑	
RH-23d			~↓			↑↑

*Kh – rigidez horizontal, β - razón de amortiguamiento, Kv – rigidez vertical

En general, se observó que había más propiedades en el rango leve en los prototipos a pequeña escala UN-FREI en comparación con los prototipos UR-FREI, lo que demuestra una mayor estabilidad de los prototipos UN-FREI frente a las condiciones ambientales.

El aumento de la rigidez genera mayores aceleraciones debido a un menor periodo en el espectro de respuesta de la edificación aislada, lo cual se evita al diseñar una estructura. El aumento del amortiguamiento favorece la reducción de desplazamientos.

En los especímenes de UN-FREI y UR-FREI el módulo de corte (directamente proporcional a la rigidez horizontal) y el amortiguamiento disminuyeron al exponerlos a RH durante 30d. Mientras en los prototipos a escala reducida de UN-FREI la rigidez horizontal y el amortiguamiento aumentaron con RH a 31d, en los prototipos a escala de UR-FREI la rigidez disminuyó y el amortiguamiento aumentó con RH a 31d. No se puede establecer una relación entre los resultados de la matriz y los prototipos a escala. Lo anterior es similar a lo presentado en la sección 4.1.1, donde la ganancia de masa variaba según el tamaño del espécimen.

4.3.Evaluación de la respuesta sísmica de una estructura aislada en su base

Para analizar como los aisladores sísmicos expuestos a condiciones ambientales pueden modificar la respuesta sísmica de una edificación, se procedió a aplicar los resultados de los ensayos mecánicos en el modelo de la edificación tipo.

Inicialmente, se calculó la máxima ganancia y pérdida de rigidez horizontal, rigidez vertical y amortiguamiento según el tipo de exposición, luego se determinó un valor promedio de aumento y reducción de cada propiedad, para establecer $\lambda_{(ae,max)}$ y $\lambda_{(ae,min)}$. Las ecuaciones Ec. *4* y Ec. *5* se modificaron para solo considerar el factor de modificación que tiene en cuenta las condiciones ambientales, es decir que, $\lambda_{(test,max)}$, $\lambda_{(test,min)}$, $\lambda_{(spec,max)}$, y $\lambda_{(spec,min)}$ se asumieron como 1, similar con el procedimiento usado por (Calabrese *et al.*, 2020). En la Tabla 7, se presentan los factores usados para modificar las propiedades de los aisladores fibroreforzados en la edificación. En adelante, D_{TM} se relaciona al modelo sin cambios en las propiedades, D_{TM} max al modelo con $\lambda_{(ae,max)}$ y D_{TM} min al modelo con $\lambda_{(ae,min)}$.

Tabla 7. Factores de modificación de condiciones ambientales

UN-FREI				UR-FREI			
	$\lambda_{(ae,max)}$		$\lambda_{(ae,min)}$	$\lambda_{(ae,max)}$		$\lambda_{(ae,min)}$	
Kh	1.07	Kh	1.00	Kh	1.00	Kh	0.94
β	1.03	β	0.98	β	1.12	β	0.94
Kv	1.00	Kv	0.99	Kv	1.11	Kv	1.00

Al comparar las Tabla 1 y Tabla 7, los valores presentados para $\lambda_{(ae,max)}$ y $\lambda_{(ae,min)}$ son inferiores a los propuestos en ASCE 7-16 (2017). Los factores de modificación definidos por la ASCE garantizan que las propiedades utilizadas en el análisis y el diseño reflejan las condiciones desfavorables e incorporan un margen de seguridad al considerar cómo las condiciones ambientales pueden degradar el rendimiento del sistema de aislamiento. Tomando en cuenta la Ec. *4* y Ec. *5*, son valores que modifican las propiedades de los aisladores en más de un 40%, lo que genera en el caso más crítico mayores derivas, cortantes e índices de sobreesfuerzo. Los valores encontrados en esta investigación ofrecen una mejor idea de los factores que pueden utilizar para

el diseño de estructuras asiladas a partir de ensayos de laboratorios realizados en el material UN-FREI y UR-FREI.

En la Figura 23, se presenta el porcentaje de derivas por piso, un factor muy relevante en la evaluación de la respuesta sísmica de las edificaciones, donde el límite es 1.5% en edificaciones aisladas con análisis cronológico. La deriva para el edificio aislado sin factores de modificación fue cercana a 1.0% debido a que, al continuar reduciendo las dimensiones de las columnas, se sobrepasaban los índices de sobreesfuerzo.

En el caso de UN-FREI, $\lambda_{(ae,min)}$ para Kh, β y Kv, fue cercano a 1, por lo cual, es congruente que las derivas con D_{TM} y D_{TM} min sean muy similares. Mientras que al aplicar el factor $\lambda_{(ae,max)}$, las derivas aumentaron. Para UR-FREI se observa que $\lambda_{(ae,max)}$, aumenta las derivas mientras que $\lambda_{(ae,min)}$ las disminuye.

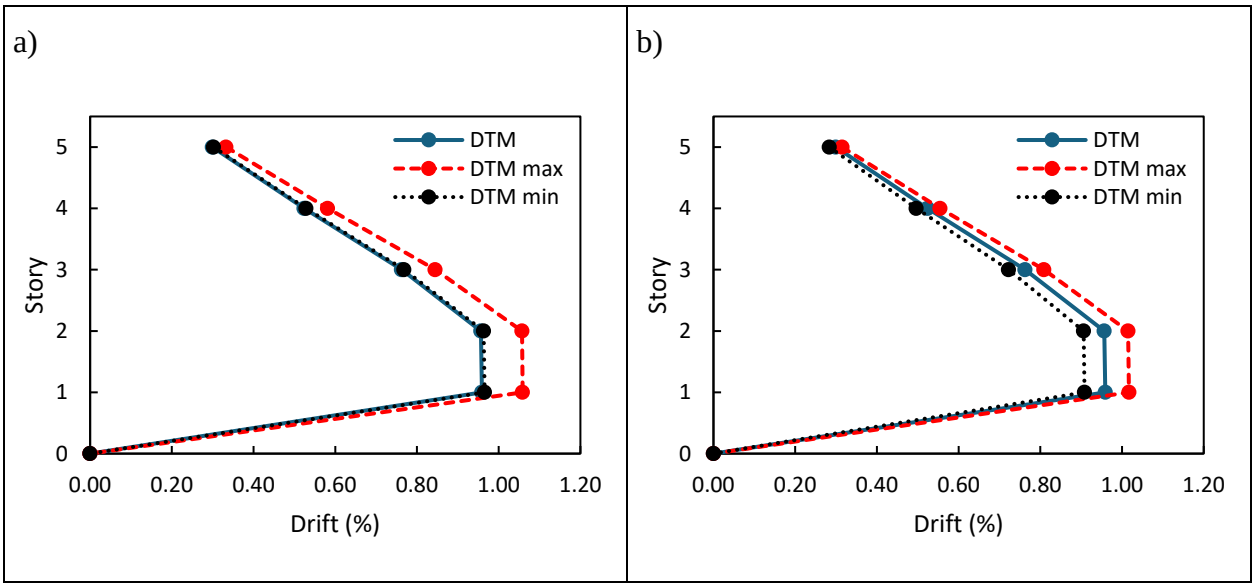


Figura 23. Comparación de derivas entre D_{TM}, D_{TM} max y D_{TM} min: a) UN-FREI y b) UR-FREI.

El período fundamental de una estructura con aislamiento sísmico en la base se determina en gran medida por la rigidez horizontal del sistema aislado y la masa total de la estructura (Ec. 8). Al aumentar Kh disminuye el periodo fundamental del sistema aislado, lo que aumenta la rigidez de la estructura. Un periodo menor en el espectro de respuesta implica mayores aceleraciones que aumenta las fuerzas transmitidas al edificio y por ende las derivas entre pisos.

$T_M = 2\pi\sqrt{\frac{M}{K_h}}$	*Ec. 8*

Tabla 8 presenta los periodos en el primer modo de vibración obtenidos para D_{TM}, D_{TM} max y D_{TM} min en ambos materiales.

Tabla 8. Periodos según el factor de modificación

Periodo	UN-FREI	UR-FREI
T D_{TM} (s)	2.42	2.42
T D_{TM} min (s)	2.43	2.50
T D_{TM} max (s)	2.34	2.39

Las cortantes por piso se observan en la Figura 24. D_{TM} y D_{TM} min presentan cortantes por piso casi idénticas, debido a que el factor de modificación es cercano a 1. Al aplicar el factor $\lambda_{(ae,max)}$, los cortantes por piso aumentaron 545 kN y 373 kN para UN-FREI y UR-FREI, respectivamente. Al incrementar Kh, aumenta la cortante basal ya que las fuerzas sísmicas transmitidas a la base son mayores.

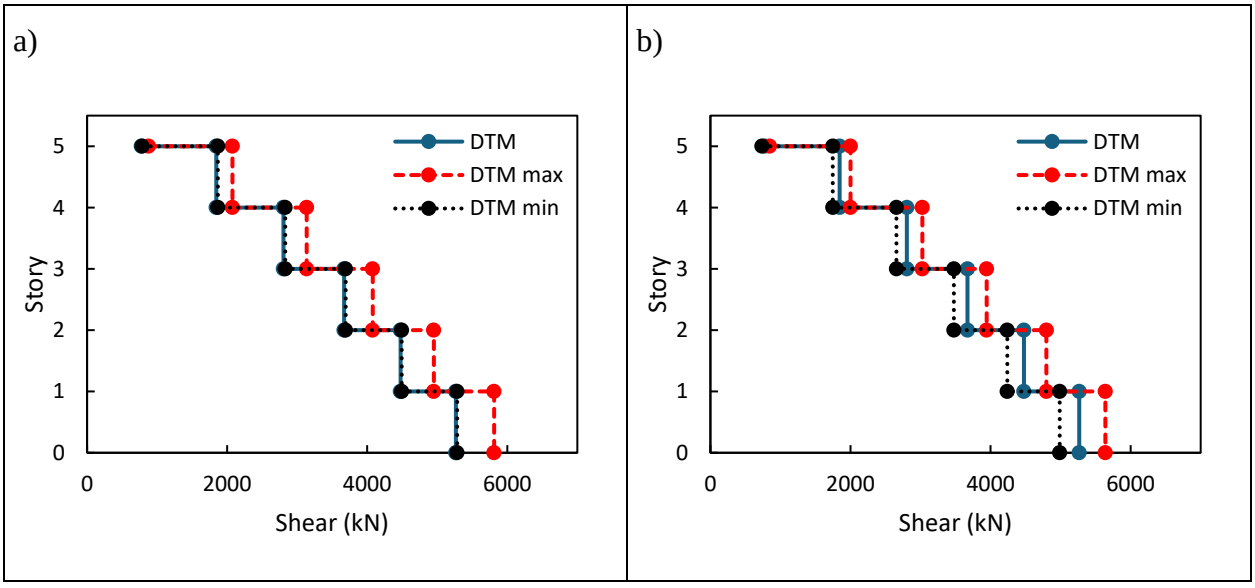


Figura 24. Comparación de cortantes por piso entre D_{TM}, D_{TM} max y D_{TM} min: a) UN-FREI y b) UR-FREI.)

La Figura 25 presenta los índices de sobreesfuerzo de dos columnas del primer piso (Figura 11.a.). Las fuerzas no deben ser superiores a la capacidad del material o del elemento estructural, como lo demuestran los índices de sobreesfuerzo que no superan 1.0.

Al aplicar el factor $\lambda_{(ae,max)}$, los índices de sobreesfuerzo aumentan, lo que significa que el elemento está trabajando más cerca de su capacidad máxima aumentando el riesgo de falla del elemento. Lo anterior debido a que el periodo es menor y se presentan mayores fuerzas sísmicas que deben ser absorbidas por los elementos estructurales. Por lo tanto, habrá mayores cantidades de acero y secciones de pilares más grandes para controlar las derivas, que también se ven afectadas. Los índices de sobreesfuerzos son menores cuando se aplica $\lambda_{(ae,min)}$. En lo que respecta a UR-FREI, los índices de sobreesfuerzo son menores para $\lambda_{(ae,max)}$ y $\lambda_{(ae,min)}$, porque tienen periodos más cortos que UN-FREI (Tabla 8).

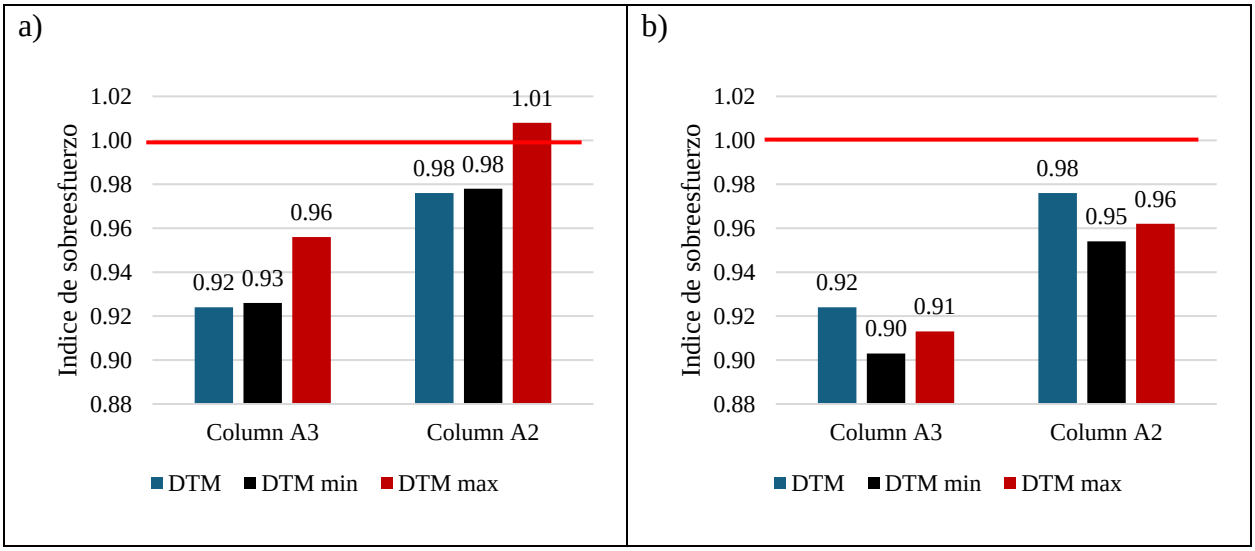


Figura 25. Comparación de los índices de sobreesfuerzos entre D_{TM}, D_{TM} max y D_{TM} min: a) UN-FREI y b) UR-FREI.

5. CONCLUSIONES

En este trabajo de grado se realizó una investigación para evaluar el efecto de las condiciones ambientales sobre una serie de propiedades mecánicas de una mezcla de caucho natural (UN-FREI) y un compuesto de caucho reciclado (UR-FREI), materiales que pueden ser utilizados para la fabricación de aisladores sísmicos de bajo costo en Colombia. Se realizaron comparaciones entre ambos materiales para determinar diferencias en sus comportamientos.

Las propiedades evaluadas en UN-FREI y UR-FREI mostraron mayores cambios en las probetas que en los prototipos a escala reducida. Esto se debe a que las probetas pequeñas tienen una mayor relación superficie-volumen, lo que facilita una mayor interacción con el entorno. El cambio máximo observado para todas las propiedades y condiciones evaluadas es 41,6% para los especímenes UN-FREI y 48,6% para UR-FREI (exposición al agua salada). Para los prototipos a escala reducida, el cambio máximo es significativamente inferior, con un 11,6% para UN-FREI y un 12,1% para UR-FREI (exposición RH-31d). Los prototipos a escala reducida tienen un mayor volumen en relación con su superficie, lo que se traduce en una menor influencia en sus propiedades.

En los prototipos a escala reducida, la rigidez horizontal aumentó en el UN-FREI en las condiciones evaluadas, siendo la mayor ganancia a los 31 días de HR, con 10,60% y 7,22% a 100% y 75% de deformación. El aumento de la rigidez puede limitar la capacidad del sistema de absorber y disipar energía a través de la deformación viscoelástica del material elastomérico, es decir, la capacidad de amortiguamiento del sistema estructural puede ser reducida. Esto debe tenerse en cuenta en los UR-FREI porque tienen una rigidez horizontal elevada y una deformación máxima del 50%. Un sistema con alta rigidez efectiva tiende a tener una capacidad de deformación limitada durante un evento sísmico. Esto significa que el sistema de disipación puede alcanzar su capacidad de deformación máxima más rápidamente y la estructura quedará expuesta a las fuerzas sísmicas directas. Además, la elevada rigidez efectiva de la UR-FREI dificultó la observación de un cambio notable con diferentes exposiciones ambientales.

Los factores de modificación de ASCE 7-16 (2017) establecen un rango de seguridad de diseño estructural frente a las condiciones de exposición durante la vida útil del edificio. Sin embargo, los factores de modificación ambientales obtenidos en este estudio son inferiores a los presentados por ASCE 7-16 (2017), lo que refleja la importancia de que cada fabricante realice

ensayos para cuantificar los efectos del envejecimiento, las condiciones ambientales, el calentamiento, la tasa de carga y la variación de fabricación. La realización de estas pruebas puede proporcionar una justificación para utilizar valores diferentes a los de la norma, que pueden ser más conservadores y dar lugar a un sobredimensionamiento de los aisladores.

Se observó que al incluir los factores de modificación en la modelación de la estructura aislada ($\lambda_{(ae,max)}$ y $\lambda_{(ae,min)}$), la respuesta del edificio se ve afectada particularmente en el caso de aplicar el factor máximo; la deriva, el cortante basal y los índices de sobreesfuerzo se incrementan debido a la disminución del periodo y al aumento de las aceleraciones, lo que podría llevar a un diseño estructural conservador.

Finalmente, en futuras investigaciones se recomienda mejorar la mezcla de caucho reciclado para aumentar la cohesión de las partículas y permitir mayores deformaciones del material en los ensayos de tensión en probetas y corte-compresión en prototipos a escalada reducida. Además, aumentar el tiempo de exposición a los agentes ambientales aquí presentados, podría dar mayor claridad sobre el comportamiento del material con el paso del tiempo para posteriormente, establecer los factores de modificación de propiedades partir de los resultados experimentales.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AIS, A.C. de I.S. (2010) 'NSR10 - Título A: Requisitos generales de diseño y construcción sismo resistente', *Reglamento Colombiano De Construcción Sismo Resistente NSR-10* [Preprint].

Alyami, M.H. *et al.* (2019) 'Potential accelerated test methods for physical sulfate attack on concrete', *Construction and Building Materials*, 229, p. 116920. Available at: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116920.

Arriagada Rosas, J.A. (2005) *Aislación Sísmica de un Edificio de Oficinas de Siete Pisos. (Análisis Comparativo de Comportamiento y Costos con un Edificio Tradicional)*. Universidad Austral de Chile.

ASCE (2017) *Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures*. Reston, VA: American Society of Civil Engineers. Available at: https://doi.org/10.1061/9780784414248.

ASTM D395-18 (2018) ‘Standard Test Methods for Rubber Property—Compression Set’, *ASTM International*, pp. 1–8. Available at: https://doi.org/10.1520/D0395-18.

ASTM D4014-03 (2018) ‘Standard Specification for Plain and Steel-Laminated Elastomeric Bearings for Bridges’, *ASTM International*, pp. 1–7. Available at: https://doi.org/0.1520/D4014-03R18.

ASTM D412-16 (2021) ‘Standard Test Methods for Vulcanized Rubber and Thermoplastic Elastomers— Tension’, *ASTM International*, pp. 1–14. Available at: https://doi.org/10.1520/D0412-16R21.

ASTM D575-91 (2018) ‘Standard Test Methods for Rubber Properties in Compression’, *ASTM International*, pp. 1–4. Available at: https://doi.org/10.1520/D0575-91R18.

ATC-17 (2002) ‘ATC-17-2 Seminar on response modification performance-based seismic design’, *A.T.C.*

Auroy, M. *et al.* (2018) ‘Comparison between natural and accelerated carbonation (3% CO2): Impact on mineralogy, microstructure, water retention and cracking’, *Cement and Concrete Research*, 109(September 2017), pp. 64–80. Available at: https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.04.012.

Barmo, A., Mualla, I.H. and Hasan, H.T. (2015) ‘The Behavior of Multi-Story Buildings Seismically Isolated System Hybrid Isolation (Friction, Rubber and with the Addition of Rotational Friction Dampers)’, *Open Journal of Earthquake Research*, 04(01), pp. 1–13. Available at: https://doi.org/10.4236/ojer.2015.41001.

Bastidas-Arteaga, E. *et al.* (2010) ‘Influence of weather and global warming in chloride ingress into concrete: A stochastic approach’, *Structural Safety*, 32(4), pp. 238–249. Available at: https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2010.03.002.

Bayraktar, A., Keypour, H. and Naderzadeh, A. (2012) *Application of Ancient Earthquake Resistant Method in Modern Construction Technology*, *15th World Conference on Earthquake Engineering (15WCEE)*. Available at: https://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/WCEE2012_5773.pdf.

Billah, A.M. and Todorov, B. (2019) ‘Effects of subfreezing temperature on the seismic response of lead rubber bearing isolated bridge’, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 126,

p. 105814. Available at: https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2019.105814.

Boubakri, A. *et al.* (2010) 'Study of UV-aging of thermoplastic polyurethane material', *Materials Science and Engineering: A*, 527(7–8), pp. 1649–1654. Available at: https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.01.014.

Calabrese, A. *et al.* (2015) 'Shaking table investigation of a novel, low-cost, base isolation technology using recycled rubber10.1016/j.matdes.2014.09.032', *Structural Control and Health Monitoring*, 22(1), pp. 107–122. Available at: https://doi.org/10.1002/stc.1663.

Calabrese, A. *et al.* (2019) 'Recycled Rubber Fiber Reinforced Bearings (RR-FRBs) as base isolators for residential buildings in developing countries: The demonstration building of Pasir Badak, Indonesia', *Engineering Structures*, 192, pp. 126–144. Available at: https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.04.076.

Calabrese, A. *et al.* (2020) 'Effects of the long-term aging of glass-fiber reinforced bearings (FRBs) on the seismic response of a base-isolated residential building', *Engineering Structures*, 221, p. 110735. Available at: https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110735.

Cambier, S.M. and Frankel, G.S. (2014) 'Coating and Interface Degradation of Coated steel, Part 2: Accelerated Laboratory Tests', *Electrochimica Acta*, 136, pp. 442–449. Available at: https://doi.org/10.1016/j.electacta.2014.05.111.

Cardone, D. and Gesualdi, G. (2012) 'Experimental evaluation of the mechanical behavior of elastomeric materials for seismic applications at different air temperatures', *International Journal of Mechanical Sciences*, 64(1), pp. 127–143. Available at: https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2012.07.008.

Cilento, F., Losanno, D. and Piga, L. (2022) 'An experimental study on a novel reclaimed rubber compound for fiber-reinforced seismic isolators', *Structures*, 45, pp. 9–22. Available at: https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.09.009.

Diepens, M. and Gijsman, P. (2008) 'Photo-oxidative degradation of bisphenol A polycarbonate and its possible initiation processes', *Polymer Degradation and Stability*, 93(7), pp. 1383–1388. Available at: https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2008.03.028.

Escobedo, D. de L. (2018) 'El papel de la INGENIERÍA ante los sismos', *Ciencia*, 69(3), pp. 24–29.

FEMA 450 (2003) ‘RECOMMENDED PROVISIONS FOR SEISMIC REGULATIONS FOR NEW BUILDINGS AND OTHER STRUCTURES (FEMA 450)’, *Building Seismic Safety Council (BSSC) of the National Institute of Building Sciences*.

Fuller, K.N.G., Gough, J. and Thomas, A.G. (2004) ‘The effect of low-temperature crystallization on the mechanical behavior of rubber’, *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, 42(11), pp. 2181–2190. Available at: https://doi.org/10.1002/polb.20091.

Le Gac, P.Y. *et al.* (2012) ‘Ageing mechanism and mechanical degradation behaviour of polychloroprene rubber in a marine environment: Comparison of accelerated ageing and long term exposure’, *Polymer Degradation and Stability*, 97(3), pp. 288–296. Available at: https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2011.12.015.

Genatios, C. and Lafuente, M. (2016) *Introducción al uso de aisladores y disipadores en estructuras*. CAF-Banco. Edited by P. Maragno.

Gjorgjiev, I. and Garevski, M. (2012) ‘Replacement of the Old Rubber Bearings of the First Base Isolated Building in the World’, in *15th World Conference of Earthquake Engineering 2012 (15WCEE)*. Lisbon, Portugal, pp. 1–7.

Gómez Lera, S., Huerta Gómez de Merodio, M.C. and Alarcón Álvarez, E. (1991) ‘Análisis Estructural: Métodos de cálculo en Ingeniería Sísmica’, p. 257.

Gu, H., Itoh, Y. and Satoh, K. (2005) ‘Effect of rubber bearing ageing on seismic response of base-isolated steel bridges’, in *Fourth International Conference on Advances in Steel Structures*. Elsevier, pp. 1627–1632. Available at: https://doi.org/10.1016/B978-008044637-0/50242-0.

Gu, H.S. and Itoh, Y. (2010) ‘Ageing Behaviour of Natural Rubber and High Damping Rubber Materials Used in Bridge Rubber Bearings’, *Advances in Structural Engineering*, 13(6), pp. 1105–1113. Available at: https://doi.org/10.1260/1369-4332.13.6.1105.

Habieb, A.B., Milani, G. and 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, pp. 380–396. Available at: https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2018.04.002.

Van den Heede, P., Thiel, C. and De Belie, N. (2020) ‘Natural and accelerated carbonation behaviour of high-volume fly ash (HVFA) mortar: Effects on internal moisture, microstructure

and carbonated phase proportioning', *Cement and Concrete Composites*, 113(April), p. 103713. Available at: https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103713.

Heikkilä, A. *et al.* (2009) 'Characterizing a UV chamber with mercury lamps for assessment of comparability to natural UV conditions', *Polymer Testing*, 28(1), pp. 57–65. Available at: https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2008.10.005.

IDEAM (2015) *CARÁCTERÍSTICAS CLIMATOLÓGICAS DE CIUDADES PRINCIPALES Y MUNICIPIOS TURÍSTICOS*. Available at: http://www.ideam.gov.co/documents/21021/418894/Características+de+Ciudades+Principales+y+Municipios+Turísticos.pdf/c3ca90c8-1072-434a-a235-91baee8c73fc.

IDIGER, I.D. de G. de R. y C.C. (2021) *Caracterización General del Escenario de Riesgo Sísmico*. Available at: https://www.idiger.gov.co/rsismico.

Itoh, Y. and Gu, H.S. (2007) 'Effect of ultraviolet irradiation on surface rubber used in bridge bearing', *Journal of Structural Engineering*. Society of Civil Engineers., pp. 696–705.

Itoh, Y. and Gu, H.S. (2009) 'Prediction of Aging Characteristics in Natural Rubber Bearings Used in Bridges', *Journal of Bridge Engineering*, 14(2), pp. 122–128.

Kang, G.J. and Kang, B.S. (2009) 'Dynamic analysis of fiber-reinforced elastomeric isolation structures', *Journal of Mechanical Science and Technology*, 23(4), pp. 1132–1141. Available at: https://doi.org/10.1007/s12206-008-1214-y.

Kelly, J.M. (1999) 'Analysis of fiber-reinforced elastomeric isolators', *Seismology and Earthquake Engineering*, 2(1), pp. 19–34.

Kelly, J.M. and Konstantinidis, D. (2011) *Mechanics of rubber bearings for seismic and vibration isolation, John Wiley & Sons*.

Lainé, E. *et al.* (2019) 'Effects of sorption and desorption of CO2 on the thermomechanical experimental behavior of HNBR and FKM O-rings - Influence of nanofiller-reinforced rubber', *Polymer Testing*, 75, pp. 298–311. Available at: https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2019.02.010.

Liu, M. *et al.* (2023) 'Carbonation depth model for loaded reinforced concrete (RC) beams under time-dependent relative humidity conditions', *Journal of Building Engineering*, 65, p.

105618. Available at: https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105618.

Losanno, D. *et al.* (2019) 'Experimental assessment and analytical modeling of novel fiber-reinforced isolators in unbounded configuration', *Composite Structures*, 212, pp. 66–82. Available at: https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.01.026.

Losanno, D. *et al.* (2020) 'Experimental performance of unbonded polyester and carbon fiber reinforced elastomeric isolators under bidirectional seismic excitation', *Engineering Structures*, 209, p. 110003. Available at: https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.110003.

Losanno, D. *et al.* (2022) 'Preliminary Investigation of Aging Effects on Recycled Rubber Fiber Reinforced Bearings (RR-FRBs)', *Journal of Earthquake Engineering*, 26(10), pp. 5407–5424. Available at: https://doi.org/10.1080/13632469.2021.1871683.

Losanno, D., De Domenico, D. and Madera-Sierra, I.E. (2022) 'Experimental testing of full-scale fiber reinforced elastomeric isolators (FREIs) in unbounded configuration', *Engineering Structures*, 260, p. 114234. Available at: https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114234.

M Kelly, J. (2018) 'Vertical Flexibility in Isolation Systems', *Civil Engineering Research Journal*, 4(1). Available at: https://doi.org/10.19080/CERJ.2018.04.555629.

Ma, Y. *et al.* (2019) 'Experimental research on the time-varying law of performance for natural rubber laminated bearings subjected to seawater dry-wet cycles', *Engineering Structures*, 195, pp. 159–171. Available at: https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.05.101.

Madera-Sierra, I.E. (2018) *Desarrollo tecnológico de un aislador sísmico de bajo costo para edificaciones bajas [Technological development of a low-cost seismic isolator for low-rise buildings]*. [Unpublished PhD thesis] Universidad del Valle.

Madera Sierra, I.E. *et al.* (2019) 'Development and experimental behavior of HDR seismic isolators for low-rise residential buildings', *Engineering Structures*, 183, pp. 894–906. Available at: https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.01.037.

Makris, N. (2019) 'Seismic isolation: Early history', *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 48(2), pp. 269–283. Available at: https://doi.org/10.1002/eqe.3124.

Mishra, H.K., Igarashi, A. and Matsushima, H. (2013) 'Finite element analysis and experimental verification of the scrap tire rubber pad isolator', *Bulletin of Earthquake*

Engineering, 11(2), pp. 687–707. Available at: https://doi.org/10.1007/s10518-012-9393-4.

Moon, B.-Y. *et al.* (2002) 'Design and manufacturing of fiber reinforced elastomeric isolator for seismic isolation', *Journal of Materials Processing Technology*, 130–131, pp. 145–150. Available at: https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00713-6.

Nilsson, L.-O. (2019) 'Corrosion of steel in concrete', in *Developments in the Formulation and Reinforcement of Concrete*. Elsevier, pp. 115–129. Available at: https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102616-8.00005-8.

Ortega Escobar, L.F. (2021) *Prototipos de aisladores sísmicos con matriz de caucho reciclado para la mitigación de riesgo en estructuras [Prototypes of seismic isolators with recycled rubber matrix for risk mitigation in structures]*. [Unpublished Master thesis] Universidad del Valle.

Ortega, L.F. *et al.* (2023) 'Performance of prototype seismic isolators reinforced with fiber and a recycled rubber tire matrix', *Engineering Structures*, 278, p. 115422. Available at: https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.115422.

Pasqualini, L. (2022) *El terremoto más fuerte jamás registrado en la Tierra, Meteored Italia*. Available at: https://www.tiempo.com/noticias/ciencia/el-terremoto-mas-fuerte-jamas-registrado-en-la-tierra.html.

Payà, N. (2022) *La radiación solar aumenta año tras año, ¿qué consecuencias puede tener?*, *Meteored*. Available at: https://www.tiempo.com/noticias/actualidad/la-radiacion-solar-aumenta-ano-tras-ano-europa-riesgo-salud.html.

Pickett, J.E. and Coyle, D.J. (2013) 'Hydrolysis kinetics of condensation polymers under humidity aging conditions', *Polymer Degradation and Stability*, 98(7), pp. 1311–1320. Available at: https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2013.04.001.

Qu, F. *et al.* (2021) 'Durability deterioration of concrete under marine environment from material to structure: A critical review', *Journal of Building Engineering*, 35, p. 102074. Available at: https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.102074.

Ramani, V. and Zhang, L. (2022) 'Impacts of climate change on long-term reliability of reinforced concrete structures due to chloride ingress', *Construction and Building Materials*, 354, p. 129091. Available at: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129091.

Reichle, D.E. (2020) ‘Anthropogenic alterations to the global carbon cycle and climate change’, in *The Global Carbon Cycle and Climate Change*. Elsevier, pp. 209–251. Available at: https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820244-9.00011-1.

Robinson, B. (2011) ‘Seismic Isolation and Protection Systems’, *Anti-Seismic Systems International Society*, 2(1), pp. 1–94.

Shah, V. and Bishnoi, S. (2018) ‘Carbonation resistance of cements containing supplementary cementitious materials and its relation to various parameters of concrete’, *Construction and Building Materials*, 178, pp. 219–232. Available at: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.162.

Shimizu, K. *et al.* (2016) ‘Weatherability of Polypropylene by Accelerated Weathering Tests and Outdoor Exposure Tests in Japan’, *Journal of Polymers*, 2016, pp. 1–14. Available at: https://doi.org/10.1155/2016/6539567.

Spizzuoco, M., Calabrese, A. and Serino, G. (2014) ‘Innovative low-cost recycled rubber–fiber reinforced isolator: Experimental tests and Finite Element Analyses’, *Engineering Structures*, 76, pp. 99–111. Available at: https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.07.001.

Stewart, M.G. and Bastidas-Arteaga, E. (2019) ‘Corrosion of Concrete and Steel Structures in a Changing Climate’, in *Climate Adaptation Engineering*. Elsevier, pp. 99–125. Available at: https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816782-3.00004-8.

Stewart, M.G., Wang, X. and Nguyen, M.N. (2012) ‘Climate change adaptation for corrosion control of concrete infrastructure’, *Structural Safety*, 35, pp. 29–39. Available at: https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2011.10.002.

Stiling, P. (2009) ‘Greenhouse Gases, Global Warming, and Insects’, in *Encyclopedia of Insects*. Elsevier, pp. 428–431. Available at: https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374144-8.00121-1.

Stroeven, P., Hu, J. and Koleva, D.A. (2010) ‘Concrete porosimetry: Aspects of feasibility, reliability and economy’, *Cement and Concrete Composites*, 32(4), pp. 291–299. Available at: https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.01.007.

Sugandhini, H.K. *et al.* (2022) ‘A review on concrete’s durability in India – Framework for performance-based approach’, *Materials Today: Proceedings*, 60, pp. 545–551. Available at:

https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.01.437.

Tansel, B. and Zhang, K. (2022) 'Effects of saltwater intrusion and sea level rise on aging and corrosion rates of iron pipes in water distribution and wastewater collection systems in coastal areas', *Journal of Environmental Management*, 315, p. 115153. Available at: https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115153.

Toopchi-Nezhad, H., Tait, M.J. and Drysdale, R.G. (2008) 'Lateral Response Evaluation of Fiber-Reinforced Neoprene Seismic Isolators Utilized in an Unbonded Application', *Journal of Structural Engineering*, 134(10), pp. 1627–1637. Available at: https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2008)134:10(1627).

Turan, D. and Poulis, J.A. (2020) 'Influence of moisture and CO2 on the material behavior of thermoplastic elastomers for beer bottle closures', *Polymer Testing*, 92(August), p. 106875. Available at: https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2020.106875.

Vaverková, E. *et al.* (2020) 'Environmental changes and their impact on human behaviour - Case study of the incidence of skin cancer', *Science of The Total Environment*, 738, p. 139788. Available at: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139788.

Wang, M. and Zhang, G. (2022) 'Mechanical properties and seismic isolation behavior of scrap tire pads subjected to thermal-cold cycles in rural construction', *Structures*, 40, pp. 607–620. Available at: https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.04.057.

Xie, F. *et al.* (2019) 'Degradation and stabilization of polyurethane elastomers', *Progress in Polymer Science*, 90, pp. 211–268. Available at: https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2018.12.003.

Xu, Z. *et al.* (2022) 'Effects of temperature, humidity and CO2 concentration on carbonation of cement-based materials: A review', *Construction and Building Materials*, 346, p. 128399. Available at: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128399.

ANEXOS

Anexo 1. Memoria de cálculo para el diseño de FREI desconectados

Cantidad de aisladores		N	20		
Peso total (carga permanente D+0,5L)		W	19760.42	kN	
Periodo objetivo		T_D	2.5	s	
Deformación de corte directa máxima		γ_s	160	%	
Amortiguamiento goma	160%	β	6.1	%	
Amortiguamiento goma	140%	β	6.2	%	
Modulo de cortante de la goma	160%	G	588.6	kN/m2	
Modulo de cortante de la goma	140%	G	603.3	kN/m2	
Modulo de cortante de la goma	20%	G	686.7	kN/m2	
Aceleración de la gravedad		g	9.81	m/s2	
Rigidez total requerida		K_{Htotal}	12723.5106	kN/m	
Rigidez requerida para cada aislador		K_{Hi}	636.175529	kN/m	

Cálculo desplazamiento máximo y de diseño

Parámetro de aceleración espectral para un período de 1seg y amor. 5%	SD1	0.338		
Máxima respuesta espectral amorti. 5% ($SM1 = 1.5SD1$)	SM1	0.506		
Factor de amortiguamiento (tabla), Bm	Bm	1.048	(tabla)	
Desplazamiento máximo de diseño D_M	D_M	0.300	m	

Cálculo Desplazamiento Total Máximo

Dimensión en planta más grande de la estructura	d	20.8	m	
Dimensión en planta más corta de la estructura medida perperdicular a d	b	14.8	m	
Excentricidad accidental	e_{acc}	1.04	m	
Excentricidad horizontal entre el centro de masa de la estructura encima del aislador y el centro de rigidez del sistema de aislación	eh	0.67	m	
Excentricidad total	e	1.71	m	

Desplazamiento máximo total de diseño D_{TM}

Radio de giro del sistema de aislamiento	r1	212.733532		
Razón periodo efectivo traslacional y el periodo efectivo rotacional	PT	4.39		
Desplazamiento máximo total de diseño (incluye accidental)	D_{TM}	0.302	m	
DTM>1.15DM	D_{TM}	0.345	m	Use

Coeficiente para cálculo de periodo aproximado	Cr	0.047	Tabla A.4.2-1	
	α	0.9	Tabla A.4.2-1	
Altura del edificio	hn	15.8	m	
Periodo fundamental de la estructura	T	0.5635	s	

Predimensionamiento

		%ar	70.62%		
Espesor total de la goma	$H_r = \frac{D_{TM}}{\gamma}$	Hr	0.2157	m	
		Hr	0.2160	m	use
Area aislador		A	0.33	m2	
	$K_H = \frac{\%_{ar} GA}{Hr} \rightarrow A = \frac{K_H Hr}{\%_{ar} G}$	A	0.442	m2	use
		D	0.65	m	
		D	0.75	m	INGRESAI
Espesor capas de goma	Entre 6-12 mm	tr	9.0	mm	INGRESAI
Factor de forma	>10	S1	20.833	OK	
	>2	S2	3.472	OK	
Cantidad capas de goma		n	24		
		n	24		Use
Espesor del refuerzo		tf	1.1	mm	

Altura total del aislador

Espesor placas extremas	t_{cext}	0		
Altura aislador: goma + fibra	h	0.241	m	
Altura total aislador: goma + fibra + placas	H	0.241	m	
Modulo de elasticidad de la fibra de refuerzo	Ef	1175	Mpa	

Límite superior e inferior rigidez

λmax	0
λmin	0

Recalculo de rigidez horizontal	D_M	$K_H = \frac{\%_{ar} GA}{Hr}$	Kh	871.35	kN/m	
	D_{TM}		Kh	850.12	kN/m	

Rigidez vertical del aislador

Modulo de cortante de la goma (20%)	G	686.7	kN/m2	
	G	0.6867	MPa	
Modulo de compresión para el conjunto goma-fibra	Ecf	71531.25	kN/m2	
Rigidez vertical	Kv	146303.418	kN/m	

Relación rigideces	D_M	$\frac{K_v}{K_h} > 100$	Kv/Kh	167.903739	OK	
	D_{TM}		Kv/Kh	172.097053	OK	

Verificación periodo natural

Periodo natural	D_M			Tteorico	2.14	s
	D_{TM}	Tmod	2.42	Tteorico	2.16	s
Frecuencia horizontal				f	0.4	Hz
Frecuencia vertical						
	D_M			f	23.889274	Hz
	D_{TM}			f	23.5964363	Hz

Carga actuante máxima sobre aisladores

Para D_M (con el K en D_M)		Pmax		
			2100	kN
Para D_{TM} (con el K en D_{TM})		Pmax		
			2200	kN

Verificación de pandeo

Área de corte efectiva	$A_s = \frac{Ah}{H_r}$	As	0.49353275	m2
Rigidez de corte efectiva		Ps	338.908941	kN
Inercia islador		I	0.01553156	m4
Rigidez a la inclinación	$(EI)_{eff} = \frac{1}{3} E_{cf} I$	$(EI)_{eff}$	370.330526	kN*m2
Carga de alabeo para una columna sin deformación al esfuerzo al corte		P_E	62773.2499	kN
Carga crítica para pandeo		Pcrit	4446.1	kN

<u>Para D_M</u>				
Factor de seguridad		F.S.	1	
Pcrit/Pmax>F.S.		Pcrit/Pmax	2.1172	OK
Deformación		d	0.4001	(tabla)
		θ	1.159 rad	(tabla)
Área reducida		Ar	0.223	
		P	3156.988	
		P/Pmax	1.5033	OK
<u>Para D_{TM}</u>				
Factor de seguridad		F.S.	1	
Pcrit/Pmax>F.S.		Pcrit/Pmax	2.0209	OK
Deformación		d	0.4601	(tabla)
		θ	1.092 rad	(tabla)
Área reducida		Ar	0.192	
		P	2930.754	
		P/Pmax	1.3322	OK

Deformación angular máxima

<u>Para D_M</u>

Módulo de Young para la goma en la región de bajas deformaciones		Eo	2746.8	kN/m2
Módulo de compresibilidad del caucho (K=2000 Mpa)		K	2000000	kN/m2
Dureza			57	shore A
Factor que depende de la dureza		k	0.62	s/u
Deformación angular asociada al corte		γs	1.39	
Deformación unitaria en compresión		εc	0.00320948	
Deformación angular asociada a la compresión	si S ≤15	γc		
	si S ≥15	γc	0.699	
		θ	0.003	rad

Deformación angular asociada a la rotación			γr	0.00043403	
Deformación angular máxima			γmax	2.0885	
Deformación unitaria			εb	5.5	
Factor de seguridad			F.S.	1.5	
		γmax_propuesto		3.1167	OK

Para D_{TM}

Módulo de Young para la goma en la región de bajas deformaciones			Eo	2746.8	kN/m2
Módulo de compresibilidad del caucho (K=2000 Mpa)			K	2000000	kN/m2
Dureza				57	shore A
Factor que depende de la dureza			k	0.62	s/u
Deformación angular asociada al corte			γs	1.60	
Deformación unitaria en compresión			εc	0.00336231	
Deformación angular asociada a la compresión	si S ≤15		γc		
	si S ≥15		γc	0.732	
			θ	0.003	rad
Deformación angular asociada a la rotación			γr	0.00043403	
Deformación angular máxima			γmax	2.3302	
Deformación unitaria			εb	5.5	
Factor de seguridad			F.S.	1.5	
		γmax_propuesto		3.1167	OK

Verificaicón de volcamiento

Para D_M

			Dmax	0.3643	m
Factor de seguridad	$D_{máx} = \frac{(W/N)\varphi}{(W/N)+K_H H} > D_M$		F.S.	1	
		Dmax/DM		1.2139	OK

Para D_{TM}

			Dmax	0.3658	m
Factor de seguridad			F.S.	1	
		Dmax/DTM		1.0601	OK

Propiedades Bilineales

Para D_M

Rigidez efectiva			Keff=Kh	871.35	kN/m
Desplazamiento			D_M	0.300	m
			λ	0.1	
Desplazamiento de fluencia			Dy	0.0216	m
Amortiguamiento efectivo	Horizontal		βeff=β	6.1	%
	Vertical		β	1	%
Energía disipada por los aisladores			E_D	30.08	kN*m
Valor capacidad (Fuerza) a cero deformación			Q	27.00	kN
Rigidez post-fluencia			K2=Kp	781.39	kN/m
Rigidez elástica			K1=Ke	2031.31	kN/m
Fuerza de fluencia			Fy	43.88	kN
Frecuencia angular			ω	2.51	rad/s
Masa de la estructura distribuida en cada aislador			M	100.715715	kN*s2/m
Amortiguamiento efectivo	Horizontal		Ch	42.2974393	kN*s/m
	Vertical		Cv	76.7725298	kN*s/m
Relación de rigidez post-fluencia			Kp/Ke	0.38467011	
Fuerza restauradora			FDM50%	2884.83654	
			0.025W	494.010582	OK

Para D_{TM}

Rigidez efectiva			Keff=Kh	850.12	kN/m
Desplazamiento			D_{TM}	0.345	m
			λ	0.1	

Desplazamiento de fluencia		Dy	0.0216	m
Amortiguamiento efectivo	Horizontal	βeff=β	6.1	%
	Vertical	β	1	%
Energía disipada por los aisladores		E_D	38.81	kN*m
Valor capacidad (Fuerza) a cero deformación		Q	29.99	kN
Rigidez post-fluencia		K2=Kp	763.23	kN/m
Rigidez elástica		K1=Ke	2151.57	kN/m
Fuerza de fluencia		Fy	46.47	kN
Frecuencia angular		ω	2.51	rad/s
Masa de la estructura distribuida en cada aislador		M	100.715715	kN*s2/m
Amortiguamiento efectivo	Horizontal	Ch	41.2668204	kN*s/m
	Vertical	Cv	76.7725298	kN*s/m
Relación de rigidez post-fluencia		Kp/Ke	0.35472904	
Fuerza restauradora		FDM50%	3233.69254	
		0.025W	494.010582	OK

Características ETABS

Densidad fibra	γ_{fibra}	1000	kg/m3
Volumen fibra	Vfibra	0.0111772	m3
Masa fibra	Mf	11.1771976	kg
Densidad caucho	γ_{caucho}	1200	kg/m3
Volumen caucho	Vcaucho	0.09542588	m3
Masa caucho	M	114.511052	kg
Masa del aislador	Mais	125.688	kg
Peso del aislador	Wais	1233.00	N
Peso total aisladores	Wais	24.66	kN

Para desplazamiento DTM

Características desplazamiento vertical U1

Rigidez efectiva	Kv	146303418	N/m
Amortiguamiento efectivo	Cv	76772.53	N*s/m

Características desplazamiento vehorizontal U2=U3

Rigidez efectiva	Keff	850121.57	N/m
Amortiguamiento efectivo	Ch	41266.82	N*s/m
Rigidez elástica	Ke	2151572.72	N/m
Esfuerzo de fluencia	fy	46473.97	N
Relación de rigidez post fluencia	Kp/Ke	0.3547	
Rigidez post fluencia de la estructura	Kp	763225.32	N

Cortantes basales mínimas del modelo

Desplazamiento D_{TM}

Cortante basal estructura debajo del aislador

Máxima rigidez efectiva sistema aislación para desplazamiento de diseño	K_{TM}	17002.4315	kN/m
Factor reducción desplazamiento total máximo de diseño		1	

Desplazamiento total máximo de diseño			D_{TM}	0.345 m
Cortante basal debajo del amostiguador	$V_b = K_{TM} D_{TM}$		Vb	5867.619 kN/m
Irregularidad planta	Tipo	0	ϕp	1
Irregularidad altura	Tipo	0	ϕa	1
Porcentaje reducción cortante basal debajo amortiguador según irregularidad				90%
Cortante basal debajo del aislador final			Vb	5280.8571 kN

Cortante basal estructuras encima del aislador

Coeficiente de disipación de energía		R	7
Coeficiente relacionado con sistema estructural utilizado		Ri	2
Peso sísmico (D+0.5L) encima aisladores sin incluir piso de los aisladores		Ws	15732.7932 kN
Porcentaje reducción cortante basal debajo amortiguador según irregularidad			100%
Fuerza lateral sin reducir	$V_{st} = V_b \left(\frac{W_s}{W}\right)^{(1-2,5\beta_{TM})}$	V_{st}	4353.21 kN
Cortante basal encima amortiguador	$V_{st} = \frac{V_{st}}{Ri}$	V_s	2176.61 kN

Verificación Vs

Fuerza requerida para activar el sistema de asilamiento Vi

Rigidez elástica		Ke	2151.57 kN/m
Desplazamiento de fluencia		Dy	0.0216 m
	$V_i = 1.5 K_e D_y$	Vi	1394.22 kN
Fuerza lateral sin reducir	$V_{st} = V_i \left(\frac{W_s}{W}\right)^{(1-2,5\beta_{TM})}$	V_{st}	1149.31 kN

Fuerza sísmica estructura empotrada con igual peso Fs

Aceleración espectral periodo de 0.2 seg			
		S_{DS}	0.75
Grupo de uso			I
Factor de importancia			1
Coeficiente de respuesta sísmica	$C_s = \frac{S_{DS}}{R/I}$	C_S	0.375
Periodo de transición de periodo largo		T_L	3 seg
Valores límites para Coef. Resp. sísmica			
Si TTM<TL	$C_s = \frac{S_{D1}}{T_{TM}(R/I)}$	C_S	0.0780
Si TTM>TL	$C_s = \frac{S_{D1} T_L}{T_{TM}{}^2 (R/I)}$	C_S	No aplica este límite
Si S1>0.6 seg	$C_s > \frac{0.5 S_1}{(R/I)}$	C_S	No aplica este límite
Finalmente		Cs	0.15606 USE

	Según Micro. Para TDTM	Sa	0.15603	INGRESAR
	Carga permanente (D+0.5L)	Ws	15732.7932	kN
		Fs	2454.83944	kN
Cortante basal final encima amortiguador		Vs	2454.84	kN

1. Materiales

1.1 Aislador

Diametro	D	750.00	mm
Espesor capa de caucho	tr	9	mm
Total capas de caucho	nr	24	
Modulo de corte del caucho def. 20%	G	0.6867	MPa
Altura total del caucho	Hr	216	mm
Area aislador	A	441786.5	mm2
Factor de forma	S	20.83333	
Modulo de compresibilidad del caucho	K	2000	MPa

1.2 Fibra

Poliester

Poisson	v	0.2	
Espesor capa	tf	1.1	mm
Modulo	Ef	1176	MPa

2. Propiedades verticales

Modulo de compresión caucho-acero	Ecs	1788.28	MPa
	α	0.03	
	αR	9.78	
	Ecf/Ecs	0.04	(grafica)
	β	2.67	
Modulo de compresión caucho-fibra	Ecf	71.5	MPa
Rigidez vertical desconectado	Kv	146303	N/mm
	P	1600000	N
	%P	0.036	
	Psc	57600	N
	ΔP	1542400	N
	Δ=urf	10.54	mm

3. Rigidez horizontal

3.1 Desplazamientos

140%	D_M	300	mm
160%	D_{TM}	345	mm

3.2 Area efectiva D_M

Altura total del aislador	H (mm)	241.3	mm
	ε	0.035	
Desplazamiento del caucho inconfinado	ur	8.45	mm
Desplazamiento del caucho confinado	urf	10.54	mm
Desplazamiento del caucho bajo la carga de diseño	uth	18.99	mm
Altura del aislador comprimido	h	222.31	mm
	do	93.82	mm
	smax	379.03	mm
	s	206.27	mm
	c	669.79	mm

	θ	2.21	rad
	Ad	98753	mm2
	Ateo r	343033	mm2
	%A	77.65%	

3.3 Area efectiva D_{TM}

Altura total del aislador	H (mm)	241.3	mm
	ε	0.035	
Desplazamiento del caucho inconfinado	ur	8.45	mm
Desplazamiento del caucho confinado	urf	10.54	mm
Desplazamiento del caucho bajo la carga de diseño	uth	18.99	mm
Altura del aislador comprimido	h	222.31	mm
	do	93.82	mm
	smax	379.03	mm
	s	251.28	mm
	c	708.01	mm
	θ	2.47	rad
	Ad	129815	mm2
	Ateo r	311971	mm2
	%A	70.62%	