

Evaluación experimental y numérica del uso de caucho reciclado como apoyo elastomérico en modelos de puentes simplemente apoyados

Experimental and numerical evaluation of the use of recycled rubber as elastomeric bearing in simply supported bridge models

Camilo Higuera-Flórez ^{1a}, Jhon Cárdenas-Pulido ^{1b}, Adriana Vargas-Aguilar ²

¹ Universidad Católica de Colombia, Colombia. Correos electrónicos: ^a hchiguera@ucatolica.edu.co,
^b jwcardenas@ucatolica.edu.co

Orcid: ^a 0000-0002-1952-7983, ^b 0000-0003-4698-4896

² Escuela Militar de Cadetes General José María Córdova, Colombia.

Correo electrónico: adriana.vargas@esmic.edu.co. Orcid: 0000-0002-7404-6875

Recibido: 4 junio, 2021. Aceptado: 1 febrero, 2022. Versión final: 12 mayo, 2022.

Resumen

En la actualidad, el sector de la construcción es una de las actividades con mayor impacto, razón por la cual es necesario buscar materiales que contribuyan favorablemente al medioambiente. Con esta premisa, en el presente artículo se estudia la implementación de caucho de neumático reciclado como apoyo elastomérico en vigas simplemente apoyadas. Para tal fin, se desarrollaron tres modelos físicos de puentes de concreto reforzado con diferentes tipos de apoyo: 1) sin apoyos, 2) apoyos en neopreno y 3) apoyos en caucho reciclado, los cuales se sometieron a una prueba de vibración horizontal. Posteriormente, se desarrollaron modelos numéricos equivalentes a los ensayos físicos, y se determinó la influencia del uso de apoyos de caucho reciclado en el comportamiento mecánico de los elementos estructurales. Los resultados indican que la implementación de láminas de caucho reciclado como elementos de apoyo produce una reducción en los esfuerzos internos de los elementos estructurales y un aumento en los desplazamientos de los modelos. Dichos resultados permiten concluir preliminarmente que las láminas de caucho reciclado pueden ser utilizadas en la construcción de apoyos de estructuras de puentes.

Palabras clave: caucho reciclado; modelos de puentes; elementos finitos; apoyos elastoméricos; comportamiento mecánico.

Abstract

Nowadays, construction is one of the activities with the greatest impact, the reason why it is necessary to look for materials that contribute favorably to the environment. With this premise, this article studies the implementation of recycled tire rubber as elastomeric support in simply supported beams. For this purpose, three physical models of reinforced concrete bridges with different bearing types were developed: 1) without bearings, 2) neoprene bearings, and 3) recycled rubber bearings, which were subjected to a horizontal vibration test. Subsequently, there was a development of numerical models equivalent to physical tests, and it was determined the influence of the use of recycled rubber bearings on the mechanical behavior of the structural elements. The results indicate that the implementation of recycled rubber sheets as bearings elements produces a reduction in the internal forces of the structural elements and show an increase in the displacement of the models. The obtained results allow us to conclude that recycled rubber sheets could be used in the construction of bearings for bridge structures.

ISSN impreso: 1657 - 4583. ISSN en línea: 2145 - 8456, CC BY-ND 4.0 

Como citar: C. Higuera-Flórez, J. Cárdenas-Pulido, A. Vargas-Aguilar, "Evaluación experimental y numérica del uso de caucho reciclado como apoyo elastomérico en modelos de puentes simplemente apoyados," *Rev. UIS Ing.*, vol. 21, no. 2, pp. 165-174, 2022, doi: <https://doi.org/10.18273/revuin.v21n2-2022014>.

Keywords: recycled rubber; bridge models; finite elements; elastomeric bearings; mechanical behavior.

1. Introducción

En la actualidad, se han desarrollado varios estudios relacionados con el uso que se puede dar al caucho reciclado, motivados, en primer lugar, por la cantidad descontrolada de neumáticos desechados, así como por la afectación agresiva que este material genera al medioambiente [1]. Entre los estudios realizados se encuentran el diseño y construcción de estructuras de pavimento, el desarrollo de césped artificial, la construcción de barreras de contención y el uso como material de relleno [2], [3].

Sin embargo, y a pesar de los avances significativos en materia de diseños de pavimentos flexibles con partículas de caucho reciclado que favorecen las mezclas asfálticas, así como la regulación de su uso a través de las normas IDU e INVIAS, es importante continuar con la investigación y desarrollo de materiales innovadores que sean amigables con el medioambiente [4]. Por tanto, en el presente estudio, se explora la alternativa de implementar láminas de caucho reciclado como elemento para apoyo de estructuras, ensayándolo en modelos físicos y numéricos de puentes simplemente apoyados de viga y tablero en concreto.

Por otro lado, si bien el neopreno es considerado un material efectivo y seguro, pues logra integrarse a nivel estructural de manera óptima, y su uso e implementación está normalizado y permitido por los diferentes códigos de diseño y construcción de puentes [5], [6], es necesario buscar alternativas de materiales cuyas características sean similares o equivalentes a este material, con el fin de tener opciones en el momento de desarrollar infraestructura vial [7]. En este sentido, diferentes estudios han caracterizado las propiedades físicas y mecánicas de elementos de caucho reciclado, y de forma preliminar se ha determinado que pueden ser utilizados en aplicaciones estructurales [8], [9].

De acuerdo con lo anterior, el presente estudio se desarrolló en dos fases. La primera consistió en la fase experimental, en la cual se tuvo en cuenta la integración de la lámina de caucho al modelo físico y la emisión de una señal de vibración que pusiera a prueba el límite de funcionamiento del dispositivos de apoyo cuando es sometido a una acción que posibilita el incremento de desgaste de una estructura; lo anterior determina el posible aumento del desplazamiento de la estructura en función del tiempo, pero con un resultado efectivo en el momento de medir su capacidad de amortiguamiento y reacción [10]. De igual forma, se llevó a cabo la

caracterización del comportamiento de un modelo físico de vigas simplemente apoyadas, sometido a una vibración horizontal externa. Posteriormente, se desarrolló un modelo numérico, cuyo funcionamiento es equiparable al del modelo físico, para de esta forma poder evaluar los efectos que se producen al cambiar las condiciones de apoyo del elemento (tipo de material del apoyo y configuración geométrica).

Finalmente, se determinó la influencia de las láminas de caucho reciclado, al ser utilizado como elemento de apoyo de vigas de concreto simplemente apoyadas, y se evaluó la alternativa de su uso, en reemplazo de los neoprenos tradicionales.

2. Antecedentes teóricos

El crecimiento del parque automotor a nivel mundial acelera de manera exponencial la producción de neumáticos, lo cual lleva a un aumento en la emisión de agentes contaminantes para el medioambiente [11]. Esta problemática radica principalmente en el poco uso que se le puede dar a este producto una vez cumple su ciclo de vida, así como en la perturbación que genera por la ocupación de grandes espacios para su acopio [12]. Asimismo, es un producto que permite la incubación de insectos, lo cual genera proliferación de enfermedades, y, adicionalmente, es altamente tóxico cuando se expone al fuego [13].

Por lo anterior, resulta conveniente para el país contar con un plan de contingencia de tratamiento de estos elementos una vez hayan cumplido su ciclo de vida, teniendo pleno conocimiento de sus efectos, pues ello determina si pueden ser materiales reutilizables en diferentes escenarios o finalmente desechados de la manera más adecuada [14].

2.1. Metodologías para el reciclaje de neumáticos

En la actualidad, la industria cuenta con múltiples métodos para la recuperación del caucho de los neumáticos usados, entre los que se encuentran [10], [15], [16]:

- *Termólisis:* es la reacción que sucede cuando el neumático es sometido a un cambio de temperatura en un medio carente de oxígeno, con lo cual se separan los enlaces del elemento [10], [16].

- *Pirolisis:* es un proceso que permite la transformación del neumático usado en sus elementos primarios, a los cuales se les puede dar un uso nuevo. El proceso consiste en la trituration del neumático, para después exponerlo a altas temperaturas, lo cual da como resultado la generación de diferentes materiales tales como hidrocarburo líquido, gas y negro de humo [10], [16].
- *Incineración:* es la reacción química que se genera al someter el neumático a un tratamiento térmico, que genera la combustión de sus compuestos orgánicos. Presenta inconvenientes por sus efectos nocivos sobre el medioambiente y la salud [10], [15].
- *Trituración:* es un método por medio del cual el neumático se somete a grandes esfuerzos mecánicos, para reducir su tamaño a partículas de menor diámetro. Esto permite darle nuevas aplicaciones al material, lo cual facilita su reutilización [10], [15].

2.2. Diseño de la red neuronal artificial

Los apoyos de puentes son elementos que permiten transmitir cargas desde la superestructura a la subestructura del puente (por ejemplo, estribos o pilas) [17]. Por tal motivo, los apoyos se suelen ubicar entre los elementos de superestructura y los elementos de infraestructura del puente. Asimismo, los apoyos de puente sirven para controlar las rotaciones debidas a las deflexiones de la superestructura, y para controlar los desplazamientos a causa de la contracción térmica [18].

En la práctica del diseño estructural y la construcción existen múltiples tipos de apoyos para puentes, los cuales incluyen: cojinetes (*rocker*), rodillos (*roller*), platinas (*plates*), pot, esféricos y elastoméricos. Estos últimos, los apoyos elastoméricos, son los más ampliamente utilizados en la práctica en las últimas cuatro décadas, porque presentan múltiples ventajas respecto a otros tipos de apoyos [18]. Dichas ventajas incluyen buena resistencia mecánica, resistencia al desgaste, buen comportamiento ante cambios de temperatura, buena resistencia química, son relativamente económicos y fáciles de implementar en construcción [19]. Se debe aclarar que los apoyos elastoméricos generalmente se fabrican de una serie de láminas de neopreno adheridas de forma intercalada con platinas de acero, que forman un solo bloque continuo. Las láminas de neopreno comúnmente se elaboran con policloropreno (más conocido como neopreno), material resultante de la polimerización del cloropreno (nombre común del 2-clorobuta-1,3-dieno, con fórmula molecular C_4H_5Cl), el cual es un compuesto orgánico que trabaja como

material elastomérico y presenta todas las características anteriormente señaladas [19].

3. Metodología

3.1. Construcción de modelos físicos

Para el presente proyecto se construyeron tres modelos físicos de tamaño reducido, los cuales constan de dos vigas de 10 cm × 25 cm de alto, unidas a un tablero de 50 cm de ancho × 60 cm de largo y 5 cm de espesor, a los cuales se les incorporaron diferentes tipos de condición de apoyo en sus vigas con las siguientes denominaciones: Mod1 es el modelo básico construido en concreto reforzado sin ningún tipo de apoyo, Mod2 es el modelo físico con apoyos en láminas de caucho reciclado y Mod3 es el modelo físico con apoyos elastoméricos en neopreno.

En el caso del Mod2, se utilizaron láminas de caucho moldeadas y prensadas a partir de mezclas de 100 % de caucho tipo SBR de neumáticos reciclado, las cuales son fabricadas por la empresa Huella Urbana Ambiental S. A. S. En el caso del Mod3, se utilizaron almohadillas de apoyo elastomérico de neopreno, fabricadas por la empresa RUBBERTEC S. A. S. A los materiales de apoyo se les evaluaron las siguientes propiedades: espesor, dureza Shore A de acuerdo con la norma ASTM D2240 – 15 [20], el esfuerzo máximo a tracción, el porcentaje de elongación y el módulo de elasticidad en probetas de 140 mm de longitud, de acuerdo con la norma ASTM D412-16 [21]. Para cada propiedad, se hicieron cinco muestras para ensayo. En ese orden de ideas, los materiales utilizados para los apoyos tienen las características que se reflejan en la tabla 1.

Tabla 1. Propiedades de los materiales utilizados como apoyo en los modelos

Propiedad	Caucho reciclado	Neopreno
Espesor promedio (cm)	5,75 ± 0,02	5,80 ± 0,01
Dureza Shore A	68,0 ± 0,4	60,0 ± 0,3
Esfuerzo máximo a tracción (MPa)	2,5 ± 0,1	16,3 ± 0,1
Módulo de elasticidad (MPa)	8,3 ± 0,5	17,5 ± 0,5
Elongación (%)	69,5 ± 1,0	440,0 ± 8,0

Estos modelos fueron elaborados teniendo en cuenta las consideraciones de la mesa vibradora empleada, la cual contaba con una restricción de peso del elemento ensayado de 50 kg. Asimismo, todos los elementos de los

modelos físicos fueron fabricado utilizando concreto de $f'c=28$ MPa, como se puede ver en la [figura 1](#). De igual forma, todos los elementos de los modelos físicos se reforzaron con cuantía mínima de acero para evitar el fallo material durante los ensayos.



Figura 1. Modelo físico desarrollado. Fuente: [10].

3.2. Ensayo en la mesa vibradora

Posteriormente, se llevó a cabo el montaje en la mesa vibradora (ver [figura 2](#)), y se incluyó en ella la señal actuadora, la cual fue tomada de la literatura, y corresponde a la señal del sismo Northridge, registrado en San Francisco en el año de 1994 [10]. Adicionalmente, se incorporaron sensores de desplazamiento (LVDT) que contribuyeron a establecer los desplazamientos horizontales de los modelos [22].

Finalmente, se procedió a realizar el ensayo sobre los modelos físicos, como se puede apreciar en la [figura 3](#), variando las frecuencias de vibración de la mesa, en un rango comprendido entre 1 y 15 Hz, para posteriormente analizar las gráficas de desplazamiento vs. tiempo y de frecuencia vs. tiempo.

3.3. Ensayo en la mesa vibradora

Acto seguido, los modelos físicos fueron modelados numéricamente mediante la implementación del método de los elementos finitos (MEF) [23]. Dicha modelación incluyó todos los parámetros de los modelos físicos: resistencia a la compresión del concreto $f'c$, las dimensiones de los elementos y las propiedades de los elementos de apoyo, tanto de las láminas de caucho reciclado como de los apoyos en neopreno.



Figura 2. Montaje experimental del modelo físico en mesa vibradora. Fuente: [10].



Figura 3. Implementación del ensayo en mesa vibradora. Fuente: [10].

Para el cálculo de las rigideces de los elementos de apoyo, se utilizó el método de Kelly [24], según el cual es posible establecer las diferentes rigideces en función de la posición de la lámina y de la fuerza horizontal actuante sobre las caras de los mismos (véase la ecuación 1).

$$K = \frac{0,33 \times E \times I}{t} \quad (1)$$

La modelación numérica fue calibrada teniendo en cuenta los desplazamientos que se encontraron en el modelo físico, por lo que fue posible utilizarla para comparar múltiples parámetros entre los diferentes tipos de apoyo (ver [figura 4](#)). Asimismo, esta modelación numérica fue utilizada para obtener datos relevantes tales como los desplazamientos del elemento (horizontales y verticales), momentos en ambas direcciones en el tablero y en las vigas y esfuerzos cortantes en estas últimas.

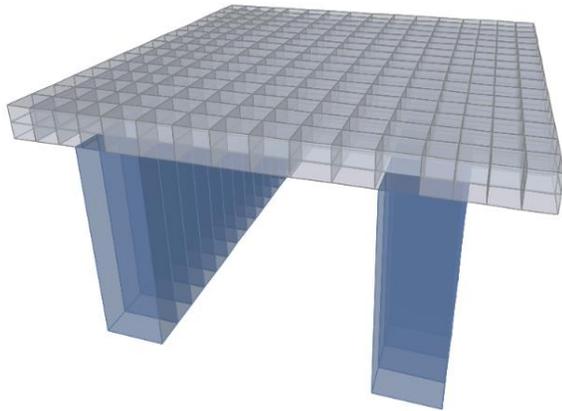


Figura 4. Modelación numérica por medio del MEF. Fuente: elaboración propia.

4. Resultados

Luego de obtener los resultados de los modelos físicos y numéricos desarrollados, fue posible establecer diferentes relaciones entre cada uno de ellos para hacer consideraciones con base en el tipo de material utilizado como apoyo elastomérico y su localización en los elementos estructurales.

En primer lugar, se hizo una comparación entre la deformación normalizada para los modelos físicos y la deformación normalizada de los modelos numéricos, con la finalidad de determinar si los modelos numéricos desarrollados son equivalentes con la experimentación realizada.

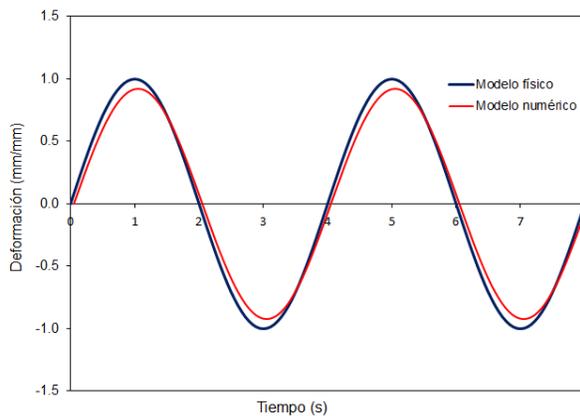


Figura 5. Comparación de la deformación en los modelos desarrollados. Fuente: elaboración propia.

De acuerdo con la figura 5, se puede establecer que los modelos numéricos desarrollados son representativos de los modelos físicos. Por tal motivo, dichos modelos numéricos pueden ser utilizados para determinar el

comportamiento mecánico de los elementos estructurales con los diferentes tipos de apoyos elastoméricos. A continuación, se presentan los resultados obtenidos para cada uno de los modelos trabajados.

4.1. Momentos en tablero

En primer lugar, en la figura 6 se presentan los resultados de momento máximo obtenidos para: a) la dirección longitudinal (1-1) y b) para la dirección transversal (2-2) del tablero, para la condición más crítica del elemento estructural.

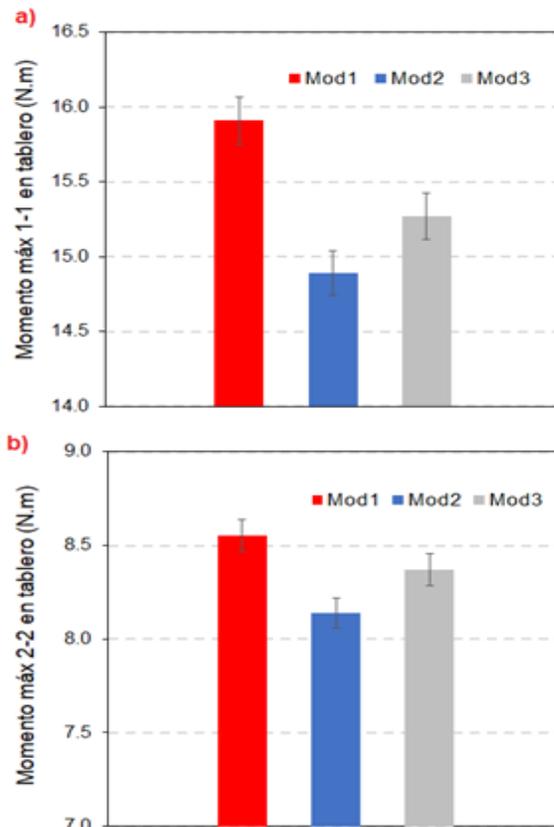


Figura 6. Resultados para los momentos 1-1 en el tablero(a) y (b) resultados para los momentos 2-2 en el tablero de los modelos en función del tipo de apoyo. Fuente: elaboración propia

4.2. Esfuerzos en vigas

Para este caso, con base en los resultados obtenidos de los modelos numéricos, se determinaron los valores más críticos de momento flector en cada una de las vigas ensayadas, los cuales son presentados en la figura 7.

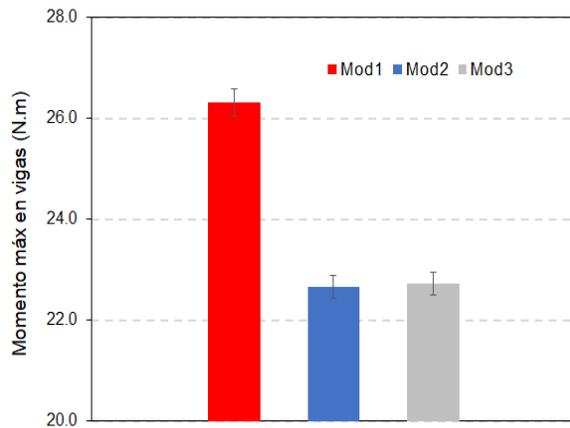


Figura 7. Resultados de momento máximo en las vigas en función del tipo de apoyo. Fuente: elaboración propia.

De la misma manera, en la [figura 8](#) se presentan los valores más críticos de cortante en los extremos laterales de las vigas ensayadas, los cuales fueron obtenidos de los modelos numéricos desarrollados.

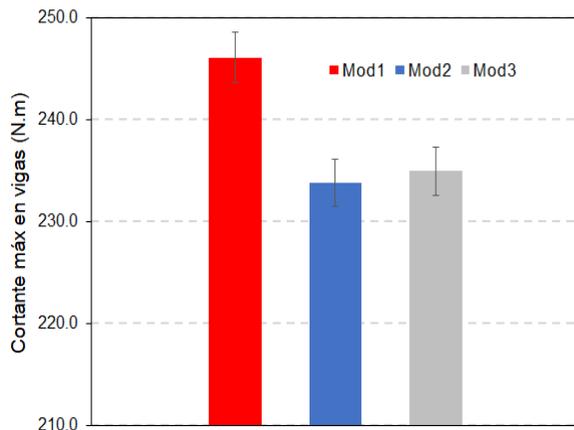


Figura 8. Resultados de cortante máximo en las vigas en función del tipo de apoyo. Fuente: elaboración propia.

4.3. Desplazamientos

Finalmente, se evaluaron los desplazamientos en los modelos desarrollados. Para tal fin, se midieron los desplazamientos finales de los modelos numéricos en las 3 direcciones de los elementos estructurales: desplazamiento en la dirección longitudinal x (δx), desplazamiento en la dirección perpendicular (δy) y desplazamiento en la dirección de la gravedad z (δz). Los resultados finales para cada uno de los modelos se presentan en la [figura 9](#).

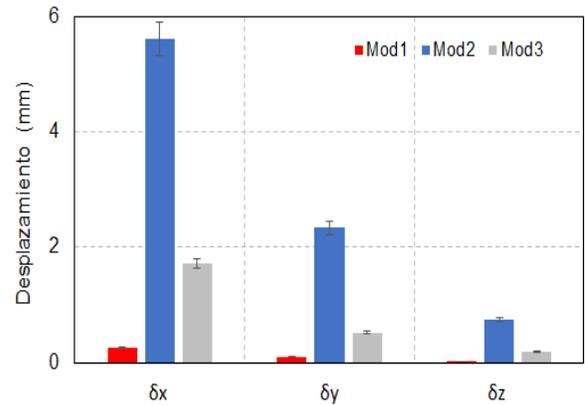


Figura 9. Resultados de desplazamiento en los apoyos en las tres direcciones principales. Fuente: elaboración propia.

5. Análisis y discusión de resultados

Con base en los resultados obtenidos, es posible establecer relaciones entre los tipos de apoyo estudiados y el comportamiento mecánico registrado tanto en los modelos físicos como en los numéricos. Lo anterior se logró mediante el registro de los desplazamientos horizontales obtenidos en el ensayo con mesa vibradora y los datos obtenidos en los modelos numéricos por medio del método de los elementos finitos (MEF), en donde, bajo las mismas condiciones (geometría, materiales y señal emitida), se obtuvieron resultados similares [25]. Este comportamiento permite afirmar que existe una buena correlación entre los modelos físicos ensayados y los modelos numéricos desarrollados por medio del método de los elementos finitos (MEF).

En ese orden de ideas, con base en los resultados obtenidos para el tablero de los elementos estructurales, se puede afirmar que la incorporación de apoyos en la base de las vigas genera una reducción de los momentos en el tablero de los modelos, lo cual, a su vez, optimiza el comportamiento estructural de las estructuras, lo cual concuerda con los resultados obtenidos por Tubaldi *et al.* [26]. De la misma manera, se puede apreciar que los apoyos elaborados con láminas de caucho reciclado producen una mayor reducción en este tipo de esfuerzos, en comparación con los apoyos de neopreno.

En el caso de las vigas de los modelos, se evaluaron los resultados de momentos y cortantes, como se puede apreciar en la [figura 7](#) y en la [figura 8](#). En el caso de los momentos, se puede establecer que la incorporación de los apoyos en los modelos reduce los esfuerzos al interior de los elementos estructurales. De manera similar a lo que pasa en el tablero, la mayor reducción se pudo

observar cuando se incluyeron los apoyos en láminas de caucho reciclado, lo cual contribuye a un mejor funcionamiento de la estructura. De igual forma, en la evaluación del esfuerzo cortante que se puede apreciar en la [figura 8](#), se pudo establecer que el uso de apoyos en los modelos reduce los esfuerzos al interior de los elementos estructurales; asimismo, para los elementos anteriormente mencionados, se encontró que el uso de apoyos en láminas de caucho reciclado resulta más óptimo si se compara con los apoyos de neopreno, lo cual concuerda con el comportamiento descrito por Zhang *et al.* [27].

En ese orden de ideas, se pudo observar que en todos los elementos estructurales (vigas y tablero) se presentó una reducción de los esfuerzos (cortante y momento) cuando se influyeron apoyos elaborados con láminas de caucho reciclado. Este comportamiento se debe a que las láminas de caucho permiten mayores deformaciones que los otros tipos de apoyo analizados; este aumento de las deformaciones en los apoyos ayuda a liberar los esfuerzos internos en los elementos estructurales.

Finalmente, se analizó la [figura 9](#), en la cual se presentan los desplazamientos en las direcciones principales de los elementos estructurales para cada uno de los modelos estudiados. De acuerdo con los resultados obtenidos, se puede establecer que la implementación de apoyos de láminas de caucho reciclado genera mayores desplazamientos en las 3 direcciones de la estructura de los modelos estudiados, comparado con los desplazamientos que se producen en los modelos sin apoyo o en las que se encuentran apoyadas sobre elastoméricos en neopreno. Este aumento en los desplazamientos de la estructura mediante la implementación de apoyos en caucho reciclado es la principal causa para la reducción de los esfuerzos cortantes y momentos tanto en tablero como en vigas, como se discutió anteriormente.

Los resultados obtenidos en el presente estudio concuerdan con el comportamiento descrito por Xiang *et al.*, según el cual el cambio del material de los apoyos genera modificaciones en los desplazamientos de los elementos estructurales [28]. El aumento en las deformaciones de los apoyos se debe principalmente a que el módulo de elasticidad (Young) de las láminas de caucho reciclado es menor que el módulo de elasticidad de las almohadillas de neopreno. Este comportamiento puede representar algunos beneficios para los elementos estructurales, debido a que se reducen los esfuerzos internos en los elementos, lo que permitiría optimizar su diseño; sin embargo, se aumentan las deformaciones (axiales y longitudinales), lo cual puede ser un problema

para su implementación en elementos de superestructura de puentes.

6. Conclusiones

De acuerdo con los resultados obtenidos en la presente investigación, se pueden emitir las siguientes conclusiones:

- Según las propiedades analizadas para cada uno de los materiales de apoyo ensayados (caucho reciclado y neopreno), y debido a la utilización del método de Kelly para corroborar la rigidez de este material, es posible establecer que el caucho reciclado de neumático es un material mucho más elástico que el neopreno, por lo tanto, permite más desplazamientos en el modelo ensayado, por lo cual contribuye a reducir los esfuerzos en los modelos estructurales de los modelos estudiados.
- La presente investigación se constituye como un trabajo pionero en la incorporación de caucho reciclado en estructuras de puentes en concreto reforzado.
- En cuanto a los resultados obtenidos, la inclusión de apoyos elastoméricos en los modelos de puentes (tanto físicos como numéricos) generó una reducción de los esfuerzos internos del material. Este comportamiento se observó tanto en los momentos en las dos direcciones en el caso del tablero como en los cortantes y momentos de las vigas. Asimismo, se pudo observar que esta reducción fue mayor cuando se implementaron láminas de caucho reciclado en comparación con los resultados obtenidos cuando se utilizaron neoprenos tradicionales.
- En el caso de las deformaciones, la implementación de elementos de apoyo produce un aumento en las deformaciones en la base de los elementos estructurales. De igual forma, se pudo comprobar que el mayor aumento en las deformaciones de los elementos estructurales se produce cuando se utilizan apoyos de láminas de caucho reciclado.
- Los resultados encontrados dentro del presente estudio son válidos para el modelo con dimensiones controladas para el cual fue ensayado. Por tanto, es necesario desarrollar más investigaciones, de tal forma que se puedan establecer correlaciones estructurales completas que permitan escalar este material propuesto a estructuras de mayor tamaño. Con lo anterior, se pueden establecer parámetros reales del comportamiento del material para ser usado como elemento de apoyo y disminuir los

esfuerzos en los elementos de este tipo de estructuras. De la misma manera, se plantea la implementación de este tipo de material en estructuras reales, que puedan ser monitoreadas en tiempo real con sensores de aceleración, con el fin de estudiar su comportamiento bajo condiciones normales de operación.

7. Recomendaciones

En la presente investigación se evaluó de forma numérica y experimental el comportamiento de láminas de caucho reciclado, utilizadas como elementos de apoyo para modelos de puentes. De acuerdo con lo anterior, y con los resultados obtenidos, se emiten las siguientes recomendaciones para trabajos futuros:

- Estudiar el comportamiento de las láminas de caucho reciclado en modelos físicos de mayor tamaño.
- Estudiar la influencia del tamaño de las láminas (área y espesor) sobre el desempeño de los apoyos.
- Variar los parámetros físicos y mecánicos de los modelos utilizados (resistencia a la compresión del concreto, ancho y altura de las vigas, número de vigas, número de apoyos, entre otros).
- Investigar la interacción de las láminas de caucho reciclado con otros materiales para la construcción de vigas de puentes, por ejemplo: acero o madera.
- Establecer la relación dimensional entre las láminas de caucho reciclado y el neopreno tradicional, de tal forma que dichas láminas puedan ser utilizadas como apoyo elastomérico en la construcción de elementos estructurales de puentes, de acuerdo con la normatividad vigente para tal fin.
- Estudiar la influencia del origen de los neumáticos en el comportamiento mecánico de las láminas de caucho reciclado.
- Estudiar la influencia que pueden tener las cargas sostenidas en el tiempo en el comportamiento de las láminas de caucho reciclado.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Instituto de Extensión e Investigación de la Escuela Militar de Cadetes General José María Córdova y al Centro de Investigaciones de la Facultad de Ingeniería (CIFI) de la Universidad Católica de Colombia, por el financiamiento de las actividades desarrolladas en la presente investigación a través del

proyecto “Evaluación de las propiedades de durabilidad de estructuras de concreto utilizando residuos de construcción y demolición (RCD’S)”. Asimismo, agradecen a los ingenieros Yudy Minota y Luis Fernando Gartner, por su colaboración en el desarrollo del presente trabajo.

Referencias

- [1] X. Li, T. Ling, K. Mo, “Functions and impacts of plastic/rubber wastes as eco-friendly aggregate in concrete – A review”, *Construction and Building Materials*, vol. 240, p. 117869, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117869>
- [2] C. Albano, N. Camacho, M. Hernández, A. Bravo, H. Guevara, “Estudio de concreto elaborado con caucho de reciclado de diferentes tamaños de partículas”, *Revista de la Facultad de Ingeniería Universidad Central de Venezuela*, vol. 23, pp. 67-75, 2008.
- [3] M. Alonso, M. Viola, “Estudio de factibilidad técnica, económica y financiera de una planta de reciclado de neumáticos fuera de uso”, trabajo de grado, Universidad Argentina de la Empresa, Buenos Aires, 2013.
- [4] *Mezclas asfálticas en caliente con asfaltos modificados con caucho por vía húmeda*, Instituto de Desarrollo Urbano, Bogotá D. C., Sección 560-11, 2011.
- [5] *LRFD Bridge Design Specifications*, AASHTO, Washington D. C., USA, 2020.
- [6] *Norma Colombiana de Diseño de Puentes CCP-14*, INVIAS, Colombia, 2015.
- [7] Y. Yuan, S. Wang, P. Tan, H. Zhu, “Mechanical performance and shear constitutive model study of a new high-capacity polyurethane elastomeric bearing”, *Construction and Building Materials*, vol. 232, p. 117227, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117227>
- [8] F. Consuegra, C. Santos, “Vibration analyses for the local and global evaluation of bridges as a tool for structural retrofit”, *Revista de la Construcción*, vol. 14, pp. 16-22, 2015.
- [9] R. Avilés, “Dispositivos para el control de vibraciones”, trabajo de grado, Universidad Austral de Chile, 2001.

- [10] L. Gartner, Y. Minota, “Evaluación preliminar del comportamiento de láminas de caucho reciclado como elemento de apoyo en modelos de vigas simplemente apoyadas sometidas a vibraciones horizontales”, trabajo de grado, Universidad Santo Tomás, Colombia, 2019.
- [11] A. Camacho-Támara, H. Reyes-Pineda, A. Lozano-Bohórquez, “Análisis y caracterización fisicoquímica del látex de caucho especie *Hevea Brasiliensis*”, *Revista Tumbaga*, vol. 1, n° 9, pp. 83-97, 2014.
- [12] L. Cardona-Gómez, L. Sánchez-Montoya, “Aprovechamiento de llantas usadas para la fabricación de pisos decorativos”, trabajo de grado, Universidad de Medellín, Colombia, 2011.
- [13] M. Zarei, Z. Rahmani, M. Zahedi, M. Nasrollahi, “Technical, Economic, and Environmental Investigation of the Effects of Rubber Powder Additive on Asphalt Mixtures”, *Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements*, vol. 146, pp. 1-7, 2020, doi: <https://doi.org/10.1061/JPEODX.0000142>
- [14] G. Peláez-Arroyave, S. Velásquez-Restrepo, D. Giraldo-Vásquez, “Aplicaciones de caucho reciclado: Una revisión de la literatura”, *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, vol. 27, n° 2, pp. 27-50, 2017, doi: <https://doi.org/10.18359/rcin.2143>
- [15] G. Castro, “Reutilización, reciclado y disposición final de neumáticos”, Facultad de Ingeniería de la Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires, 2007.
- [16] F. López-Gómez, A. López-Delgado, F. Alguacil, J. Manso, “Situación actual del tratamiento de neumáticos fuera de uso y posibilidades de obtención de negro de humo de alta pureza”, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Madrid, España, 2009.
- [17] C. Vallecilla, *Fundamentos de diseño de puentes: Ejemplos resueltos*. Colombia: Editorial Bauen, 2018.
- [18] J. Zhao, D. Tonias, *Bridge Engineering: Design, Rehabilitation, and Maintenance of Modern Highway Bridges*. New York, USA: McGraw-Hill Education, 2017.
- [19] J. Steelman, L. Fahnestock, E. Filipov, J. LaFave, J. Hajjar, D. Foutch, “Shear and Friction Response of Nonseismic Laminated Elastomeric Bridge Bearings Subject to Seismic Demands”, *Journal of Bridge Engineering*, vol. 18, pp. 612-623, 2013, doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0000406](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000406)
- [20] *Standard Test Method for Rubber Property—Durometer Hardness*, ASTM D2240-15, 2015, doi: <https://doi.org/https://doi.org/10.1520/D2240-15>
- [21] *Standard Test Methods for Vulcanized Rubber and Thermoplastic Elastomers—Tension*, ASTM D412-16, 2021.
- [22] J. Valdés, J. De la Colina, “Análisis de la Amplificación Dinámica de la Carga Viva en Puentes con Base en Pruebas Experimentales”, *Revista Tecnológica - ESPOL*, vol. 21, no. 1, pp. 149-156, 2008.
- [23] M. Jara, J. Casas-Rius, *Control de vibraciones en puentes: un estado del arte y de la práctica*. España: Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, 2002.
- [24] J. Kelly, D. Konstantinidis, *Mechanics of rubber bearings for seismic and vibration isolation*. West Sussex, UK: John Wiley & Sons, 2011.
- [25] Y. Wu, H. Wang, A. Li, D. Feng, B. Sha, Y. Zhang, “Explicit finite element analysis and experimental verification of a sliding lead rubber bearing”, *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A*, vol. 18, pp. 363–376, 2017, doi: <http://doi.org/10.1631/jzus.A1600302>
- [26] E. Tubaldi, S. Mitoulis, H. Ahmadi, “Comparison of different models for high damping rubber bearings in seismically isolated bridges”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 104, pp. 329-345, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2017.09.017>
- [27] Y. Zhang, J. Li, L. Wang, H. Wu, “Study on the Seismic Performance of Different Combinations of Rubber Bearings for Continuous Beam Bridges”, *Advances in Civil Engineering*, vol. 2020, p. 22, 2020, doi: <https://doi.org/10.1155/2020/8810874>
- [28] N. Xiang, M. Shahria-Alam, J. Li, “Shake table studies of a highway bridge model by allowing the sliding of laminated-rubber bearings with and without restraining devices”, *Engineering Structures*, vol. 171, pp. 583-601, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.05.121>