

Artículo de Investigación

# Evaluación de la resistencia a la compresión y flexión del concreto modificado con fragmentos de residuos neumáticos

## Evaluation of the compressive and flexural strength of modified concrete with fragments of tire waste

Libia L. Julio Galvis<sup>1</sup>: Corporación Universitaria Remington, Colombia.

[libia.julio@uniremington.edu.co](mailto:libia.julio@uniremington.edu.co)

Fernando A. Figueredo Negrete: Corporación Universitaria Remington, Colombia.

[fernando.figueredo@uniremington.edu.co](mailto:fernando.figueredo@uniremington.edu.co)

Luis C. Laguna Álvarez: Corporación Universitaria Remington, Colombia.

[luis.laguna.2179@miremington.edu.co](mailto:luis.laguna.2179@miremington.edu.co)

Fecha de Recepción: 04/01/2025

Fecha de Aceptación: 06/02/2025

Fecha de Publicación: 11/02/2025

### Cómo citar el artículo

Julio Galvis, L. L., Figueredo Negrete, F. A. y Laguna Álvarez, L. C. (2025). Evaluación de la resistencia a la compresión y flexión del concreto modificado con fragmentos de residuos neumáticos [Evaluation of the compressive and flexural strength of modified concrete with fragments of tire waste]. *European Public & Social Innovation Review*, 10, 01-21. <https://doi.org/10.31637/epsir-2025-1267>

### Resumen

**Introducción:** La exploración de alternativas para crear agregados y reutilizarlos como subproductos industriales es el foco de muchas investigaciones en ingeniería. Se evaluó el efecto de la sustitución parcial de arena y grava por partículas de neumáticos sobre las propiedades mecánicas de resistencia a la compresión y flexión del concreto. **Metodología:** Las mezclas se prepararon reemplazando en proporciones volumétricas de 0%, 25%, 50% y 75% con partículas de neumáticos, el agregado fino (arena) y agregado grueso (grava); también incluyó mezclas preparadas en combinación 25%:25% y 50%:50% de agregados finos y gruesos

<sup>1</sup> Autor Correspondiente: Libia Liliana Julio Galvis. Corporación Universitaria Remington (Colombia).

con partículas de neumáticos. **Resultados:** La resistencia a la compresión y flexión muestran una reducción al sustituir los áridos por partículas de neumático. La sustitución del agregado fino en la menor proporción (25%) ofrece una alternativa factible y sustentable para usos no estructurales, ya que presenta una menor variación en las propiedades evaluadas. **Discusión:** La incorporación de neumáticos disminuye las propiedades mecánicas debido a la baja adherencia interna entre las partículas de neumático y la matriz de cemento. **Conclusiones:** El neumático particulado en la fabricación del concreto constituye una estrategia eficaz para reducir el consumo de grandes cantidades de áridos naturales y mitigar su impacto ambiental.

**Palabras clave:** neumático; mezclas de concreto; resistencia a la compresión; resistencia a la flexión; agregados del concreto; propiedades mecánicas; manejo de residuos; reciclaje.

### Abstract

**Introduction:** The exploration of alternatives for the creation of aggregates and their reuse as industrial byproducts has been the spotlight of many engineering research. In this study, the effect of partial substitution of sand and gravel by tire particles on the mechanical properties of compressive and flexural strength of concrete was evaluated. **Methodology:** The mixtures were prepared by replacing in volumetric proportions of 0%, 25%, 50% and 75% with tire particles the fine aggregate (sand) and coarse aggregate (gravel); it also included mixtures prepared in a 25%:25% and 50%:50% combination of fine and coarse aggregates with tire particles. **Results:** Compressive and flexural strength showed a reduction when aggregates were replaced by tire particles. The substitution of the fine aggregate in the lowest proportion (25%) offers a feasible and sustainable alternative for non-structural uses, since it presents a smaller variation in the properties evaluated. **Discussion:** The incorporation of tires decreases the mechanical properties due to the low internal adhesion between the tire particles and the cement matrix. **Conclusions:** The particulate tire in the manufacture of concrete constitutes an effective strategy to reduce the consumption of large quantities of natural aggregates and mitigate its environmental impact.

**Keywords:** tire; concrete mixture; compressive strength; flexural strength; concrete aggregates; mechanical properties; waste management; recycling.

## 1. Introducción

En las últimas décadas, el concepto de sostenibilidad ha surgido como una temática crucial en el sector de la construcción. Esta dirección se debe en gran parte a la creciente conciencia sobre el impacto ambiental y la necesidad de preservar los recursos naturales para las generaciones futuras. En este sentido, se ha vuelto imperioso utilizar materiales ecológicos que minimicen la huella de carbono y reduzcan el consumo de energía.

Lograr incorporar agregados alternativos, o bien emplear los subproductos industriales, en los procesos constructivos no solo contribuye a la reducción de desechos, sino que también promueve una economía circular, donde los materiales se reutilizan y reciclan en lugar de una disposición final inapropiada (Bae *et al.*, 2021 y Yehia *et al.*, 2023). Estas prácticas además de ser favorables para el medio ambiente y la salud pública también pueden resultar en ahorros económicos notables y una solución eficiente para el desarrollo sostenible de los proyectos de construcción (Ulewicz, 2021).

El concreto es uno de los materiales de construcción más utilizado en el mundo y éste tiene generalmente como constituyentes los agregados finos, agregados gruesos, agua y cemento. Generalmente los agregados se extraen de canteras o riveras de ríos y se estima que para la obtención de cemento se libera aproximadamente entre 800 y 850 kilogramos de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), lo que representa entre el 5 y el 8% de las emisiones globales totales de CO<sub>2</sub> (Kajaste y Hurme, 2016).

Dentro de las alternativas para reducir la huella de carbono del cemento se encuentra prolongar la vida útil del concreto incorporando funcionalidades, lo que podría disminuir el impacto ambiental y optimizar el ciclo de vida económico de las infraestructuras de cemento modernas, indistintamente del ambiente al que están expuestas (Mackechnie y Alexander, 2009; Saha y Sarker, 2018; Seymour *et al.*, 2023).

Investigaciones adelantadas en los últimos años han demostrado que reemplazar la cantidad de agregado fino y grueso por partículas de neumático se constituye en una alternativa válida para obtener un material de construcción amigable con el ambiente (Nocera *et al.*, 2022). En la actualidad se conoce que la demanda de neumáticos para automóviles y vehículos comerciales ligeros incrementa cada año y las cifras indican que aumentó de 1335 a 1624 millones de 2012 a 2018 (Assaggaf *et al.*, 2022).

Como consecuencia de ello, se generan cantidades elevadas de llantas de vehículos que se disponen sin control en vertederos, lo cual representan un considerable riesgo para la salud pública, el medio ambiente y la economía. Dichos riesgos se manifiestan a través de la contaminación del aire, el agua y el suelo. La combustión a cielo abierto de llantas libera compuestos químicos tóxicos y partículas finas en la atmósfera, lo cual conduce a problemas respiratorios y otras afecciones de salud en las comunidades aledañas.

De la misma manera, los lixiviados provenientes de los neumáticos, fuera de uso, pueden infiltrarse en el suelo y alcanzar las fuentes de agua subterránea, contaminándolas con metales pesados y otros contaminantes peligrosos. Situación que además de comprometer la calidad del agua potable, afecta la integridad biótica de los ecosistemas acuáticos (Sofi, 2018).

Ahora bien, la eliminación de residuos de neumático ha sido un problema importante a nivel mundial y representa una gran amenaza para la ecología. Un método de eliminación inicial, que se percibió como sencillo y económico era la quema, sin embargo, la contaminación debido a la cantidad de humo, elevación de la temperatura y gases tóxicos, se convirtió en una práctica inaceptable por ley en muchos países (Gesoglu y Güneyisi, 2011), considerando adicionalmente, que el polvo residual de la quema y el aceite generado por la fusión del neumático contaminan el suelo y el agua (Sofi, 2018).

Ante dicha situación, muchas investigaciones han planteado la posibilidad de usar el neumático triturado, en la producción del concreto, como opción de reemplazo parcial o total del agregado natural; hecho que lograría ayudar significativamente al medio ambiente, reduciendo el consumo de una gran cantidad de áridos naturales, que hoy día representa un riesgo para los recursos naturales como montañas y ríos, adicionalmente promoverá la utilización efectiva de este tipo de residuos (Assaggaf *et al.*, 2022).

Se han adelantado numerosas investigaciones que exploran el uso de residuos de neumático en mezclas de concreto. Estas investigaciones se centran en evaluar las propiedades mecánicas, propiedades físicas, acústicas, propiedades de durabilidad, entre otras, del concreto modificado con dicho residuo.

En términos de tamaño, los residuos de neumático se consideran como opción de reemplazo de los constituyentes convencionales del concreto de la siguiente manera: partículas de 13 a 76 mm para el reemplazo de agregado grueso, partículas en el rango de 0,425 a 4,75 mm para el reemplazo de agregado fino, y partículas de tamaño entre 0,075 y 0,475 mm para sustituir el cemento. (Ganjian *et al.*, 2009).

Diversos estudios han demostrado que la incorporación de partículas de neumático en las mezclas de concreto, variando las proporciones de reemplazo y sus dimensiones, puede mejorar ciertas propiedades del concreto, como su capacidad aislante de sonido, disipador de energía y de vibraciones, así como la resistencia a la exposición a ambientes agresivos (Bravo y De Brito, 2012; Corinaldesi *et al.*, 2011; Fraile-García *et al.*, 2016; Gesoğlu *et al.*, 2014; Gesoğlu y Güneyisi, 2007, 2011; Holmes *et al.*, 2014; Issa y Salem, 2013; T. C. Ling *et al.*, 2010; H. Liu *et al.*, 2016; Mohammed *et al.*, 2012; Thomas, Gupta y John Panicker, 2015; Thomas y Gupta, 2015).

No obstante, se ha constatado que la adición de partículas de neumático afecta ciertas propiedades físicas como trabajabilidad y densidad, así mismo se ha evidenciado una disminución progresiva de la resistencia a la compresión, tracción, flexión y módulo de elasticidad (Aiello y Leuzzi, 2010; Al-Fakih, Mohammed, Al-Tayeb *et al.*, 2012, 2013; Aslani y Kelin, 2018; Bisht y Ramana, 2017; Bravo y De Brito, 2012; Chen *et al.*, 2021; Gesoğlu y Güneyisi, 2011; Gesoğlu *et al.*, 2014; Granzotto y de Souza, 2013; Grinys *et al.*, 2012; Gupta *et al.*, 2014; Habib *et al.*, 2020; Hilal, 2017; Holmes *et al.*, 2014; Issa y Salem, 2013; Kaewunruen *et al.*, 2018; H. Liu *et al.*, 2016; Mhaya *et al.*, 2021; Mohammadi *et al.*, 2014; Mohammed *et al.*, 2012; Murugan *et al.*, 2017; Saberian *et al.*, 2019; Saberian y Li, 2021; Sofi, 2018; Su *et al.*, 2015; Tang *et al.*, 2021; Valente y Sibai, 2019; Xu *et al.*, 2021; Xue, 2013).

Los investigadores coinciden en argumentar que la débil unión entre las partículas de neumático y la matriz de cemento emerge como el factor crucial que conduce a la disminución observada en dichas propiedades (Gesoğlu *et al.*, 2014; Gupta *et al.*, 2014; H. Liu *et al.*, 2016; Mohammed *et al.*, 2012). Estos hallazgos subrayan que la rigurosidad en el tamaño, las proporciones de reemplazo del neumático, el tipo de agregado a reemplazar, la inclusión de ciertos aditivos y la relación agua/cemento son cruciales para optimizar la integridad estructural del concreto y para la obtención de valores aceptables en las propiedades del concreto modificado (Aiello y Leuzzi, 2010; Mohammed *et al.*, 2012; Al-Tayeb *et al.*, 2013; Ganesan *et al.*, 2013; Xue, 2013; Gesoğlu *et al.*, 2014; Mohammadi *et al.*, 2014; Su *et al.*, 2015; Liu *et al.*, 2016; Lv *et al.*, 2019; Sofi, 2018; Valente y Sibai, 2019; M. Mhaya *et al.*, 2021).

Esta investigación experimental tiene como objetivo principal analizar las propiedades del concreto modificado mediante la incorporación de partículas de neumático. Para lograr este objetivo, se diseñaron diversas mezclas de concreto en las cuales se sustituyeron parcialmente los áridos naturales, tanto el agregado grueso como el agregado fino, por partículas de neumáticos. El estudio se orientó en la evaluación de la resistencia a la compresión y la flexión de estas mezclas específicas.

Los resultados obtenidos se presentan y discuten detalladamente, haciendo referencia a datos experimentales previamente documentados en la literatura científica, con el propósito de contextualizar y enriquecer la comprensión de las variaciones observadas en las propiedades mecánicas del concreto modificado con partículas de neumático, proporcionando así una visión más completa y fundamentada de los efectos de esta modificación en el desempeño estructural del material.

## 2. Metodología

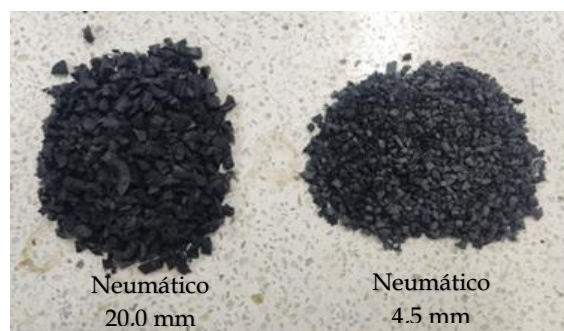
### 2.1. Materiales y métodos

Para esta investigación, se emplearon los materiales convencionales en la fabricación de las mezclas de concreto que incluyen cemento Portland Tipo I conforme a la norma Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales (ASTM) C1157 y cumpliendo requisitos de la Norma Técnica Colombiana (NTC 121:2014), grava de piedra triturada como agregado grueso, arena natural como agregado fino.

Los fragmentos de residuos neumático desmenuzados como material fino con una graduación de 4,5 mm y neumático particulado como material grueso con una graduación de 20,0 mm, fueron obtenidos a partir de trituración mecánica (Figura 1). Las propiedades de los agregados finos y gruesos se determinaron de acuerdo con los métodos de prueba estándar de ASTM C136 y NTC 77:2018.

#### Figura 1.

##### Partículas de neumático



**Fuente:** Elaboración propia (2024).

El diseño de mezcla de concreto con dos agregados y su caracterización se realizaron cumpliendo los requisitos de especificación de las normas ASTM C136, ASTM C29, ASTM C12, ASTM C128, ASTM C127, ASTM C143 y NTC 77: 2018, NTC 92: 2019, NTC 237: 2020, NTC 176: 2019 y NTC 396:2021. La arena y triturado provenientes del Río Sinú (Córdoba, Colombia) fueron suministrados por un proveedor local. El cemento empleado fue gris de uso general (Tipo I), el cual cumple con los valores de la ASTM C1157 y NTC 121 (Tipo UG).

El agua utilizada para el mezclado y curado de las muestras procedía de la red de agua para consumo humano de la ciudad de Montería (Córdoba, Colombia). El neumático triturado fue seleccionado y adquirido con una granulometría 4,5 mm y 20,0 mm. El concreto elaborado cumple con las especificaciones de la normativa NTC, que dicta una resistencia a la compresión de 3000 PSI (libras por pulgada cuadrada), que equivale a 17,81 MPa (Mega pascales) y 2583 PSI. La mezcla que se emplea sigue una proporción (1:2:3) de cemento, arena y grava, en ese orden. El asentamiento del concreto simple se ajusta según los requerimientos, con un rango de relación agua/cemento de 0,45-0,50.

Las proporciones de neumático para reemplazar agregado fino (F) y grueso (G) se establecieron en 0%, 25%, 50% y 75%, así como combinaciones 25%:25% y 50%:50% de agregado fino y grueso (F25:G25 y F50:G50). Se elaboró una muestra de control (TC) para evaluar la variación de las propiedades mecánicas estudiadas. La denominación de los diseños de mezclas y las proporciones de partículas de neumático se presentan en la Tabla 1, donde TC, F25, F50, F75, G25, G50, G75, F25G25 y F50G50 corresponden a la notación abreviada del tratamiento control y los porcentajes neumáticos que reemplazan el agregado fino y grueso, respectivamente.

**Tabla 1.**

*Diseño experimental*

Mezcla	Cemento (%)	Arena (%)	Neumático fino (%)	Grava (%)	Neumático grueso (%)	Réplicas de ensayos
TC	17,0	33,0	0,0	50,0	0,0	3,0
<b>Agregado fino reemplazado por neumático (4,50 mm)</b>						
F25	17,0	21,0	12,0	50,0	0,0	3,0
F50	17,0	16,5	16,5	50,0	0,0	3,0
F75	17,0	12,0	21,0	50,0	0,0	3,0
<b>Agregado grueso reemplazado por neumático (20,0 mm)</b>						
G25	17,0	33,0	0,0	37,5	12,5	3,0
G50	17,0	33,0	0,0	25,0	25,0	3,0
G75	17,0	33,0	0,0	12,5	37,5	3,0
<b>Agregado fino y grueso reemplazado por neumático</b>						
F25G25	17,0	21,0	12,0	37,5	12,5	3,0
F50G50	17,0	16,5	16,5	25,0	25,0	3,0

**Fuente:** Elaboración propia (2024).

Al concreto en estado fresco se le realizaron pruebas de asentamiento y en estado endurecido, a diversas edades de curado, los ensayos de resistencia a la compresión en cilindros y resistencia a la flexión en viguetas. Las pruebas de asentamiento se realizaron bajo los requerimientos de la norma ASTM C143 (NTC 396:2021). Los ensayos de resistencia a la compresión se realizaron en cilindros de 152,40 mm de diámetro y 304,80 mm de altura a los tiempos de curado de 3, 7 y 28 días de acuerdo con la norma ASTM C873 (NTC 673:2021) (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación [Icontec], 2021).

Por su parte las pruebas de resistencia a la flexión se llevaron a cabo en viguetas de 152,40 mm x 1152,40 mm x 419,10 mm al tiempo de curado de 28 días de acuerdo con lo establecido en la norma ASTM C873 (NTC 2871:2018) (Icontec, 2018). El proceso de curado con inmersión en agua en condiciones controladas se desarrolló de acuerdo con los requerimientos de la norma ASTM C31 y los requisitos de especificación de NTC 550:2000. El tratamiento estadístico de los datos se realizó mediante análisis de varianza (ANOVA) y la prueba de comparaciones múltiples - Tukey de las magnitudes de resistencias medidas para la resistencia a la compresión y flexión.

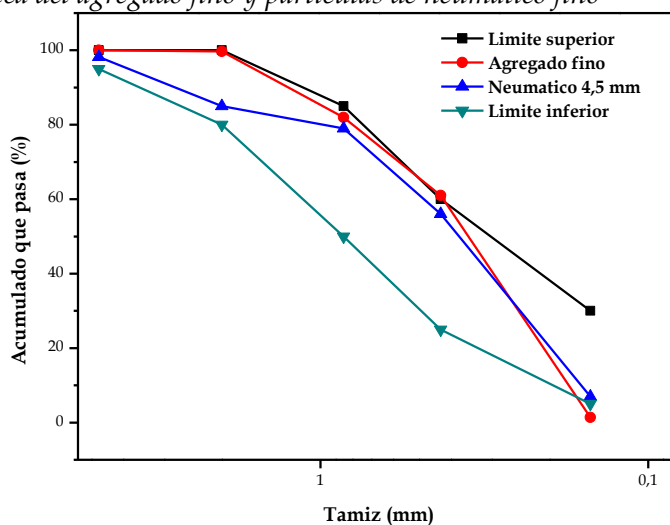
### 3. Resultados

#### 3.1. Caracterización fisicoquímica de materiales y diseño de mezclas

Para el agregado fino y neumático particulado (4,5 mm) se realizaron los ensayos de granulometría (Figuras 2). Los valores indican que el módulo de finura del agregado fino obtenido fue de 2,5 el cual, de acuerdo con los rangos establecidos, corresponde a una arena fina. Las partículas de neumático presentan un tamaño similar a la arena natural. A los agregados también se les realizó prueba de gravedad específica y porcentaje de absorción (Tabla 2).

Figura 2.

Curva granulométrica del agregado fino y partículas de neumático fino



Fuente: Elaboración propia (2024).

Tabla 2.

Propiedades de los agregados y partículas de neumático

Agregado	Gravedad Específica (g/cm <sup>3</sup> )	Absorción (%)	Módulo de finura
Arena	2,6	1,5	2,5
Grava	2,5	1,4	-
Neumático	-	21,9	-

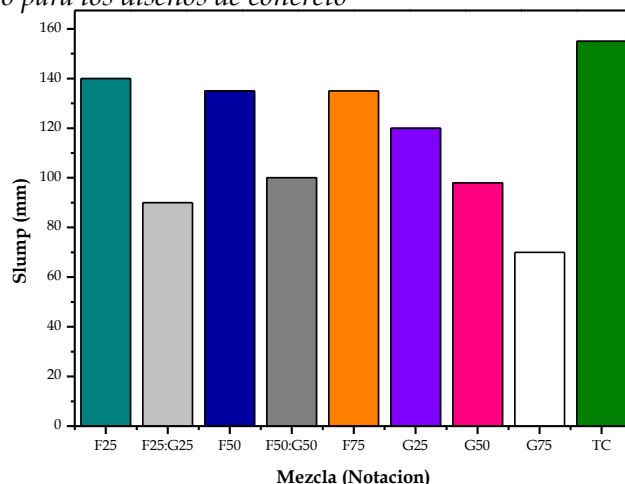
Fuente: Elaboración propia (2024).

#### 3.2. Pruebas al concreto modificado con partículas de neumático en estado fresco

Los valores del asentamiento del concreto fresco con respecto al porcentaje de neumáticos se presentan en la Figura 3.

**Figura 3.**

*Prueba de asentamiento para los diseños de concreto*



**Fuente:** Elaboración propia (2024).

### 3.3. Propiedades mecánicas al concreto modificado con partículas de neumático en estado endurecido

Los resultados de los ensayos de resistencia a la compresión y flexión se muestran en Tabla 3 y Tabla 4, así como en Figura 5, Figura 6, Figura 7 y Figura 8. Por su parte en la figura 4 se aprecian el tipo de falla para cilindros y viguetas.

**Tabla 3.**

*Resistencia a la compresión del concreto modificado con partículas de neumático*

Mezcla	Resistencia a la compresión (MPa)		
	3 días	7 días	28 días
TC	8,51	11,57	17,81
F25	7,14	8,56	9,91
F50	2,35	3,57	4,87
F75	2,26	3,36	3,91
G25	2,17	3,45	3,78
G50	1,52	2,47	2,86
G75	1,22	1,46	3,24
F25:G25	1,41	1,87	2,33
F50:50	1,27	1,69	2,08

**Fuente:** Elaboración propia (2024).

**Figura 4.**

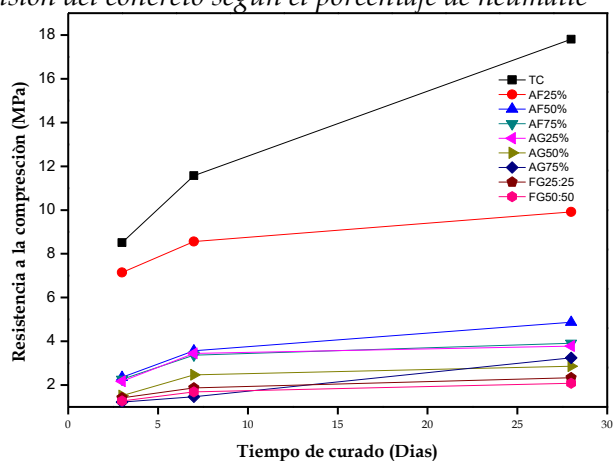
*Tipo de falla en los especímenes (cilindros y viguetas)*



**Fuente:** Elaboración propia (2024).

**Figura 5.**

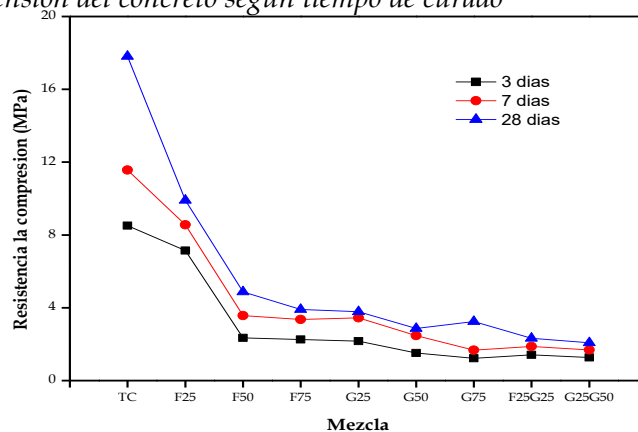
*Resistencia a la compresión del concreto según el porcentaje de neumático*



**Fuente:** Elaboración propia (2024).

**Figura 6.**

*Resistencia a la compresión del concreto según tiempo de curado*



**Fuente:** Elaboración propia (2024).

**Tabla 4.**

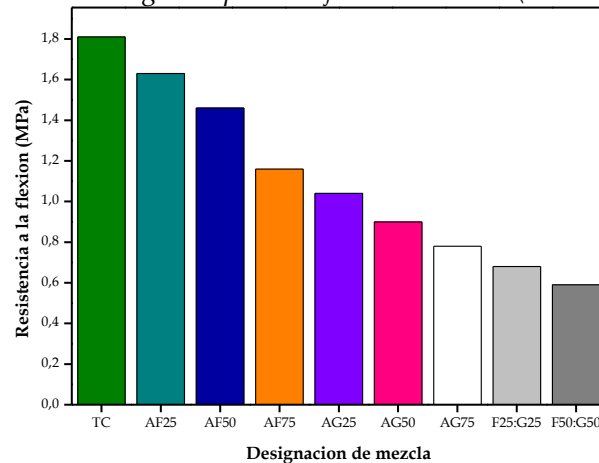
*Resistencia a la flexión del concreto modificado con partículas de neumático*

Mezcla	Resistencia a la flexión (MPa)
	28 días
TC	1,81
F25	1,63
F50	1,46
F75	1,16
G25	1,04
G50	0,90
G75	0,78
F25:G25	0,68
F50:50	0,59

**Fuente:** Elaboración propia (2024).

**Figura 7.**

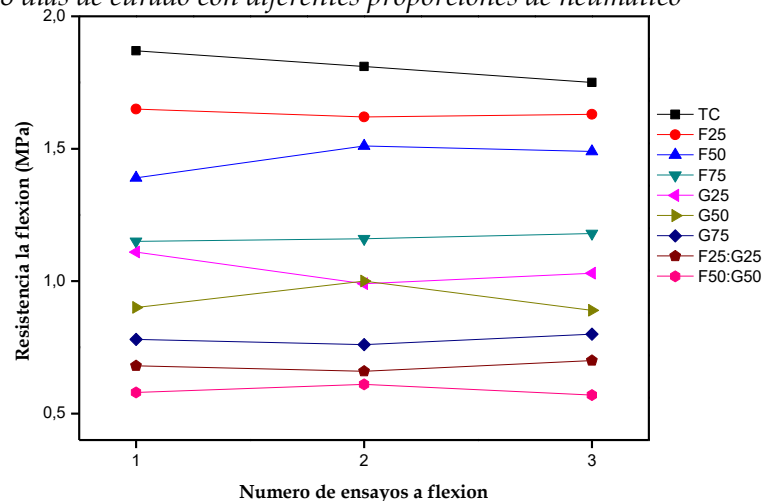
*Resistencia a la flexión del concreto según el porcentaje de neumático (28 días)*



**Fuente:** Elaboración propia (2024).

**Figura 8.**

*Resistencia a flexión a 28 días de curado con diferentes proporciones de neumático*



**Fuente:** Elaboración propia (2024).

### 3.4. Evaluación de la resistencia a la compresión con adición de cal hidratada

En el presente estudio se evaluó la adición de cal hidratada con el propósito de valorar su influencia en la resistencia a la compresión del concreto, para ello se realizaron adiciones de cal en 1% al diseño con el 25% de neumático como reemplazo del agregado fino (F25) (Tabla 5).

**Tabla 5.**

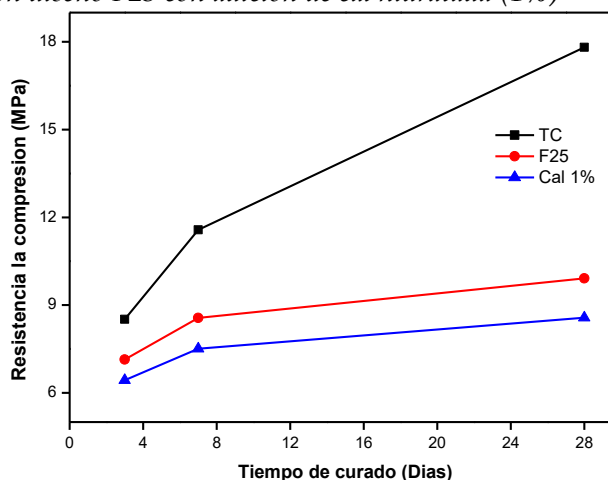
*Resistencia a la compresión del concreto modificado con partículas de neumático (F25) y adición de cal hidratada (1%)*

Mezcla	Resistencia a la compresión (MPa)		
	3 días	7 días	28 días
TC	8,51	11,57	17,81
F25	7,14	7,56	9,91
Cal	6,43	7,51	8,57

**Fuente:** Elaboración propia (2024).

**Figura 9.**

*Resistencia a la compresión diseño F25 con adición de cal hidratada (1%)*



**Fuente:** Elaboración propia (2024).

## 4. Discusión

### 4.1. Asentamiento del concreto fresco

La variación del asentamiento del concreto en función de las diversas proporciones volumétricas de reemplazo se aprecian en la Figura 3. Los diseños presentan una reducción general en los valores de asentamiento del concreto cuando se incluyen partículas de neumático como reemplazo de agregados; las mezcla de concreto con contenido de neumático fino presentaron las menores variaciones de asentamiento. En tanto que los diseños combinados y el diseño con mayor contenido de neumático grueso (G75) mostraron los valores de asentamiento más reducidos, comparados con el tratamiento de control.

Este hecho se debe principalmente a una mayor absorción de agua por parte de las partículas de neumático en comparación con los agregados naturales, lo que reduce el agua libre, haciendo así que la mezcla de concreto, en general, presente una trabajabilidad menor, pero aceptable en términos de manipulación, colocación y acabado (Alsaif *et al.*, 2018; Khaloo *et al.*, 2008). Esta situación también se explica porque las partículas finas de impurezas (como el polvo y la pelusa) presentes en el neumático podrían contribuir en la disminución de la disponibilidad de agua libre en la mezcla de concreto (Alsaif *et al.*, 2018).

Por otro lado, diversos autores argumentan que la reducción del asentamiento también está asociada a una textura rugosa de la superficie de las partículas de neumático, en comparación con los agregados convencionales, que puede incrementar la fricción entre los componentes del concreto durante la mezcla afectando su fluidez (Alsaif *et al.*, 2018; Aslani *et al.*, 2018; Ramdani *et al.*, 2019; Chen *et al.*, 2019).

#### **4.2. Resistencia a la compresión**

Los resultados de resistencia a la compresión, en Tabla 3 y Figura 5 y Figura 6, evidencian una disminución gradual con la incorporación de partículas de neumático, siendo más evidente en aquellos diseños que involucraban el reemplazo del agregado grueso. Para los diseños que involucran proporciones de reemplazo de agregado fino, específicamente F25, se registró la menor reducción en la resistencia a la compresión; el menor tamaño de partícula favorece la compactación del concreto. Los resultados para diseños combinados (F25G25 Y F50G50) exhiben igualmente reducción en la resistencia a la compresión, hallazgo que respalda la que el contenido total de las partículas de neumático influye en la propiedad mecánica valorada.

Ante la disminución de la resistencia a la compresión diversos autores coinciden en afirmar que esta reducción se debe a la débil cohesión entre las partículas del neumático y la matriz de cemento, esto se atribuye a su naturaleza hidrofóbica que conduce a formación de vacíos en la mezcla de concreto, provocando micro fisuras en el mismo (Julio *et al.*, 2024). Por su parte, a medida que transcurre el tiempo de curado es notable su influencia en el incremento de la resistencia a la compresión de las muestras (Figura 6).

En lo tocante al modelo de fractura para los cilindros (Figura 4), se observa el agrietamiento vertical discontinuo que se propaga desde la parte inferior hasta la parte superior de la probeta, con poco desprendimiento de los elementos constituyentes de las muestras.

#### **4.3. Resistencia a la flexión**

Los valores promedios de la resistencia a flexión, a los 28 días de curado, se muestran en la Tabla 4. Los resultados obtenidos señalan que la incorporación gradual de neumático triturado al concreto disminuye la resistencia a la flexión, sin embargo, aquel que incorpora un 25% mostró un comportamiento aceptable en comparación con las demás mezclas (Figura 7 y 8).

Este resultado podría atribuirse a una optimización de las propiedades mecánicas debido a una adecuada combinación de rigidez y flexibilidad proporcionada por el neumático a esta proporción específica (Al-Fakih *et al.*, 2020; Youssf *et al.*, 2018). El tipo de falla por flexión en los especímenes, para los diferentes diseños, presentó una fisura o grieta cerca de la mitad del tramo, ocasionando la ruptura en dos pedazos de la probeta (Figura 4).

#### **4.4. Evaluación de la resistencia a la compresión con adición de cal hidratada**

Los resultados obtenidos indican que la resistencia a la compresión mantiene la tendencia a la disminución (Figura 9), situación que se debe a la baja adhesión del interfaz neumático/cemento como consecuencia de la naturaleza hidrofóbica en la superficie del neumático (Youssf *et al.*, 2014). La adición de cal hidratada a la matriz de cemento puede dar lugar a la formación de soluciones alcalinas en los poros del concreto y al reaccionar con la sílice reactiva desarrollada dentro de los agregados, da como resultado la reacción álcali-sílice (ASR), situación que aumenta las tensiones internas del concreto contribuyendo a la disminución de ciertas propiedades mecánicas del concreto, tales como resistencia a la compresión y flexión (Barreto Santos *et al.*, 2020).

La sostenibilidad en el sector de la construcción se ha convertido en una prioridad y poder presentar una gestión eficiente a los residuos de neumáticos fuera de uso representa una alternativa económica y ecológica. Sin embargo, la disminución observada en ciertas propiedades mecánicas del concreto modificado con partículas de neumático se constituye en la principal limitación para su uso con fines estructurales (Dezhampanah *et al.*, 2020; Habib *et al.*, 2020; Mhaya *et al.*, 2021; Murali *et al.*, 2021; Wang *et al.*, 2018). En este sentido diversos autores señalan que el tipo de agregado a reemplazar, el tamaño de la partícula del neumático, la proporción de reemplazo, así como la inclusión de ciertos materiales en los diseños, entre otros aportan mejoras en el desempeño del concreto (Xu *et al.*, 2021; Gesoğlu *et al.*, 2014).

Por lo tanto, es posible sugerir que el agregado fino reemplazado por partículas de neumático (4,5 mm) no supere el 25%. Este diseño en particular brinda un concreto con valores aceptables en términos de propiedades físicas y mecánicas, lo cual puede ampliar sus aplicaciones constructivas como zonas peatonales, parques, estacionamientos, muros de contención y paneles de concreto. Además, dada su capacidad de absorción acústica y vibraciones, este concreto resulta idóneo para reducir niveles de ruido en entornos urbanos (Holmes *et al.*, 2014; Fraile-García *et al.*, 2016).

Ahora bien, las estructuras modernas de concreto pueden descomponerse en aproximadamente 50 a 100 años (Ahmad, 2017), en contraste, las infraestructuras romanas han permanecido intactas durante milenios en una variedad de climas, zonas sísmicas e incluso sumergidas total o parcialmente en ambientes costeros (Jackson *et al.*, 2017; Seymour *et al.*, 2023).

Esta característica de durabilidad comprobada se atribuyó al proceso de fabricación del concreto romano a partir de la mezcla de cal viva (CaO) o cal hidratada (Ca(OH)<sub>2</sub>) y ceniza volcánica, en cuyo matriz se producen fases de gel de silicato de calcio hidratado (C-S-H) y silico aluminato cálcico hidratado (CASH) que contribuyen significativamente a la durabilidad del concreto de la antigua Roma y resistencia en ambientes agresivos; adicionalmente contribuye a reducir la ocurrencia de la reacción álcali-sílice (ASR), que provoca agrietamiento en el concreto (Maragh *et al.*, 2019; Seymour *et al.*, 2023).

En este orden de ideas es necesario adelantar estudios futuros para investigar la resistencia a la compresión y flexión del concreto con contenido de neumático, en la menor proporción de reemplazo (F25), replicando el proceso de producción del concreto romano antiguo con el propósito evaluar su grado de influencia en las propiedades mecánicas mencionadas y que pueden complementar este estudio.

Es importante destacar que la inclusión de neumático, fuera de uso, como sustituto parcial de los agregados convencionales en el proceso de producción del concreto representa una estrategia efectiva y sostenible para reducir el consumo de una gran cantidad de áridos naturales, así como mitigar el impacto ambiental negativo generado como consecuencia de su inadecuada disposición final.

## 5. Conclusiones

El presente estudio ha demostrado que las partículas de neumático, fuera de uso, como reemplazo parcial de los agregados naturales, en las proporciones volumétricas de reemplazo establecidas, tienen una incidencia apreciable en las propiedades mecánicas de resistencia a la compresión y flexión.

Atendiendo a los resultados se observó que la trabajabilidad del concreto decrece con la adición progresiva de partículas de neumático, no obstante, para los diseños del concreto con proporciones de reemplazo que involucran al agregado fino, y puntualmente en la menor proporción (25%), se obtienen valores aceptables de trabajabilidad con respecto al concreto de referencia.

Por su parte las propiedades de resistencia a la compresión y flexión disminuyen conforme incrementa el porcentaje de reemplazo de neumático; hecho que es más notorio para los diseños de mezclas que involucran reemplazo del agregado grueso. El diseño de concreto con neumático triturado como reemplazo parcial del agregado fino en menor proporción (F25) es una opción viable, este diseño reporta la menor reducción en las propiedades mecánicas evaluadas, ofreciendo una posibilidad sostenible para aplicaciones con fines no estructurales.

En lo que respecta a la adición de cal hidratada en el diseño de mezcla F25, se propone que la disminución en la resistencia a la compresión es debido a la ocurrencia de la reacción álcali-sílice (ASR) que da lugar al agrietamiento del concreto por el aumento de las tensiones internas.

## 6. Referencias

- Ahmad, Z. (3 de julio 2017). Why modern mortar crumbles, but Roman concrete lasts millennia. <https://doi.org/10.1126/ciencia.aan7051>
- Aiello, M. A. y Leuzzi, F. (2010). Waste tyre rubberized concrete: Properties at fresh and hardened state. *Waste Management*, 30(8-9), 1696-1704. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.02.005>
- Al-Fakih, A., Mohammed, B. S., Wahab, M. M. A., Liew, M. S. y Mugahed Amran, Y. H. (2020). Flexural behavior of rubberized concrete interlocking masonry walls under out-of-plane load. *Construction and Building Materials*, 263, 120661 (1-10). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120661>
- Al-Tayeb, M. M., Abu Bakar, B. H., Akil, H. M. y Ismail, H. (2012). Effect of Partial Replacements of Sand and Cement by Waste Rubber on the Fracture Characteristics of Concrete. *Polymer - Plastics Technology and Engineering*, 51(6), 583-589. <https://doi.org/10.1080/03602559.2012.659307>
- Al-Tayeb, M. M., Abu Bakar, B. H., Ismail, H. y Akil, H. M. (2013). Effect of partial replacement of sand by recycled fine crumb rubber on the performance of hybrid rubberized-normal concrete under impact load: Experiment and simulation. *Journal of Cleaner Production*, 59, 284-289. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.04.026>
- Alsaif, A., Koutas, L., Bernal, S. A., Guadagnini, M. y Pilakoutas, K. (2018). Mechanical performance of steel fibre reinforced rubberised concrete for flexible concrete pavements. *Construction and Building Materials*, 172, 533-543. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.010>
- Aslani, F. y Kelin, J. (2018). Assessment and development of high-performance fibre-reinforced lightweight self-compacting concrete including recycled crumb rubber aggregates exposed to elevated temperatures. *Journal of Cleaner Production*, 200, 1009-1025. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.323>

- Aslani, F., Ma, G., Yim Wan, D. L. y Tran Le, V. X. (2018). Experimental investigation into rubber granules and their effects on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete. *Journal of Cleaner Production*, 172, 1835-1847. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.003>
- Assaggaf, R. A., Maslehuddin, M., Al-Dulaijan, S. U., Al-Osta, M. A., Ali, M. R. y Shameem, M. (2022). Cost-effective treatment of crumb rubber to improve the properties of crumb-rubber concrete. *Case Studies in Construction Materials*, 16, e00881. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e00881>
- Bae, S. H., Lee, J. I. y Choi, S. J. (2021). Characteristics of Mortars with Blast Furnace Slag Powder and Mixed Fine Aggregates Containing Ferronickel-Slag Aggregate. *Materials*, 14(19), 5879-5888. <https://doi.org/10.3390/ma14195879>
- Barreto Santos, M., De Brito, J. y Santos Silva, A. (2020). A Review on Alkali-Silica Reaction Evolution in Recycled Aggregate Concrete. *Materials*, 13(11), 2625-2644. <https://doi.org/10.3390/ma13112625>
- Bisht, K. y Ramana, P. V. (2017). Evaluation of mechanical and durability properties of crumb rubber concrete. *Construction and Building Materials*, 155, 811-817. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.131>
- Bravo, M. y De Brito, J. (2012). Concrete made with used tyre aggregate: Durability-related performance. *Journal of Cleaner Production*, 25, 42-50. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.11.066>
- Chen, A., Han, X., Wang, Z. y Guo, T. (2021). Dynamic Properties of Pretreated Rubberized Concrete under Incremental Loading. *Materials*, 14(9), 2183-2201. <https://doi.org/10.3390/ma14092183>
- Chen, Z., Li, L. y Xiong, Z. (2019). Investigation on the interfacial behaviour between the rubber-cement matrix of the rubberized concrete. *Journal of Cleaner Production*, 209, 1354-1364. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.305>
- Corinaldesi, V., Mazzoli, A. y Moriconi, G. (2011). Mechanical behaviour and thermal conductivity of mortars containing waste rubber particles. *Materials & Design*, 32(3), 1646-1650. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.10.013>
- Dezhampanah, S., Nikbin, I., Charkhtab, S., Fakhimi, F., Bazkiaei, S. M. y Mohebbi, R. (2020). Environmental performance and durability of concrete incorporating waste tire rubber and steel fiber subjected to acid attack. *Journal of Cleaner Production*, 268. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122216>
- Fraile-Garcia, E., Ferreiro-Cabello, J., Defez, B. y Peris-Fajanes, G. (2016). Acoustic behavior of hollow blocks and bricks made of concrete doped with waste-tire rubber. *Materials*, 9(12), 962-973. <https://doi.org/10.3390/ma9120962>
- Ganesan, N., Bharati Raj, J. y Shashikala, A. P. (2013). Flexural fatigue behavior of self compacting rubberized concrete. *Construction and Building Materials*, 44, 7-14. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.02.077>

- Ganjian, E., Khorami, M. y Maghsoudi, A. A. (2009). Scrap-tyre-rubber replacement for aggregate and filler in concrete. *Construction and Building Materials*, 23(5), 1828-1836. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.09.020>
- Gesoğlu, M. y Güneyisi, E. (2007). Strength development and chloride penetration in rubberized concretes with and without silica fume. *Materials and Structures*, 40(9), 953-964. <https://doi.org/10.1617/s11527-007-9279-0>
- Gesoğlu, M. y Güneyisi, E. (2011). Permeability properties of self-compacting rubberized concretes. *Construction and Building Materials*, 25(8), 3319-3326. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.03.021>
- Gesoğlu, M., Güneyisi, E., Khoshnaw, G. y İpek, S. (2014). Abrasion and freezing-thawing resistance of pervious concretes containing waste rubbers. *Construction and Building Materials*, 73, 19-24. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.047>
- Granzotto, L. y de Souza, R. A. D. (2013). Mechanical properties of structural concrete with partial replacement of fine aggregate by tire rubber. *Acta Scientiarum - Technology*, 35(1), 39-44. <https://doi.org/10.4025/actascitechnol.v35i1.11283>
- Grinys, A., Sivilevičius, H. y Daukšys, M. (2012). Tyre rubber additive effect on concrete mixture strength. *Journal of Civil Engineering and Management*, 18(3), 393-401. <https://doi.org/10.3846/13923730.2012.693536>
- Gupta, T., Chaudhary, S. y Sharma, R. K. (2014). Assessment of mechanical and durability properties of concrete containing waste rubber tire as fine aggregate. *Construction and Building Materials*, 73, 562-574. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.102>
- Habib, A., Yildirm, U. y Eren, O. (2020). Mechanical and dynamic properties of high strength concrete with well graded coarse and fine tire rubber. *Construction and Building Materials*, 246, 118502 (1-11). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118502>
- Hilal, N. N. (2017). Hardened properties of self-compacting concrete with different crumb rubber size and content. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 6(1), 191-206. <https://doi.org/10.1016/j.ijsbe.2017.03.001>
- Holmes, N., Browne, A. y Montague, C. (2014). Acoustic properties of concrete panels with crumb rubber as a fine aggregate replacement. *Construction and Building Materials*, 73, 195-204. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.107>
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2021). Concretos. Método de ensayo de resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto. <https://acortar.link/QpEiMH>
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2018). Método de ensayo para determinar la resistencia del concreto a la flexión (utilizando una viga simple con carga en los tercios medios). <https://acortar.link/NcoxJC>
- Issa, C. A. y Salem, G. (2013). Utilization of recycled crumb rubber as fine aggregates in concrete mix design. *Construction and Building Materials*, 42, 48-52. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.12.054>

- Jackson, M. D., Mulcahy, S. R., Chen, H., Li, Y., Li, Q., Cappelletti, P. y Wenk, H.-R. (2017). Phillipsite and Al-tobermorite mineral cements produced through low-temperature water-rock reactions in Roman marine concrete. *American Mineralogist*, 102(7), 1435-1450. <https://doi.org/10.2138/am-2017-5993CCBY>
- Julio, L. L., Figueredo, F. A. y Tuiran, O. (2024). Propiedades del concreto con partículas de neumático reciclado: Revisión Sistemática de la Literatura. V. Meriño *et al.* (Eds.). *Gestión del Conocimiento Perspectiva Multidisciplinaria*, 98-130. <https://acortar.link/eyW4jM>
- Kaewunruen, S., Li, D., Chen, Y. y Xiang, Z. (2018). Enhancement of dynamic damping in eco-friendly railway concrete sleepers using waste-tyre crumb rubber. *Materials*, 11(7), 1169-1188. <https://doi.org/10.3390/ma11071169>
- Kajaste, R. y Hurme, M. (2016). Cement industry greenhouse gas emissions – management options and abatement cost. *Journal of Cleaner Production*, 112, 4041-4052. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.07.055>
- Khaloo, A. R., Dehestani, M. y Rahmatabadi, P. (2008). Mechanical properties of concrete containing a high volume of tire-rubber particles. *Waste Management*, 28(12), 2472-2482. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.01.015>
- Ling, T. C., Nor, H. M. y Lim, S. K. (2010). Using recycled waste tyres in concrete paving blocks. *Proceedings of Institution of Civil Engineers: Waste and Resource Management*, 163(1), 37-45. <https://doi.org/10.1680/warm.2010.163.1.37>
- Liu, H., Wang, X., Jiao, Y. y Sha, T. (2016). Experimental Investigation of the Mechanical and Durability Properties of Crumb Rubber Concrete. *Materials*, 9(3), 172-183. <https://doi.org/10.3390/ma9030172>
- Lv, J., Zhou, T., Li, K. y Sun, K. (2019). Shrinkage Properties of Self-Compacting Rubber Lightweight Aggregate Concrete: Experimental and Analytical Studies. *Materials*, 12(24), 4059-4072. <https://doi.org/10.3390/ma12244059>
- M. Mhaya, A., Baghban, M. H., Faridmehr, I., Huseien, G. F., Abidin, A. R. Z. y Ismail, M. (2021). Performance Evaluation of Modified Rubberized Concrete Exposed to Aggressive Environments. *Materials*, 14(8), 1900-1925. <https://doi.org/10.3390/ma14081900>
- Mackechnie, J. R. y Alexander, M. G. (2009). Using Durability To Enhance Concrete Sustainability. *Journal of Green Building*, 4(3), 52-60. <https://doi.org/10.3992/jgb.4.3.52>
- Maragh, J. M., Weaver, J. C. y Masic, A. (2019). Large-scale micron-order 3D surface correlative chemical imaging of ancient Roman concrete. *PLoS ONE*, 14(2), e0210710. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0210710>
- Mohammadi, I., Khabbaz, H. y Vessalas, K. (2014). In-depth assessment of Crumb Rubber Concrete (CRC) prepared by water-soaking treatment method for rigid pavements. *Construction and Building Materials*, 71, 456-471. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.08.085>
- Mohammed, B. S., Anwar Hossain, K. M., Eng Swee, J. T., Wong, G. y Abdullahi, M. (2012). Properties of crumb rubber hollow concrete block. *Journal of Cleaner Production*, 23(1), 57-67. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.10.035>

- Murali, M., Mohammed, B. S., Abdulkadir, I., Liew, M. S. y Alaloul, W. S. (2021). Utilization of crumb rubber and high-volume fly ash in concrete for environmental sustainability: Rsm-based modeling and optimization. *Materials*, 14(12). <https://doi.org/10.3390/ma14123322>
- Murugan, R. B., Sai, E. R., Natarajan, C. y Chen, S. E. (2017). Flexural fatigue performance and mechanical properties of rubberized concrete. *Gradjevinar*, 69(11), 983-990. <https://doi.org/10.14256/JCE.1427.2015>
- Nocera, F., Wang, J., Faleschini, F., Demartino, C. y Gardoni, P. (2022). Probabilistic models of concrete compressive strength and elastic modulus with rubber aggregates. *Construction and Building Materials*, 322, 126145. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.126145>
- Ramdani, S., Guettala, A., Benmalek, M. y Aguiar, J. B. (2019). Physical and mechanical performance of concrete made with waste rubber aggregate, glass powder and silica sand powder. *Journal of Building Engineering*, 21, 302-311. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2018.11.003>
- Saberian, M. y Li, J. (2021). Effect of freeze-thaw cycles on the resilient moduli and unconfined compressive strength of rubberized recycled concrete aggregate as pavement base/subbase. *Transportation Geotechnics*, 27, 10477 (1-8) <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2020.100477>
- Saberian, M., Shi, L., Sidiq, A., Li, J., Setunge, S. y Li, C. Q. (2019). Recycled concrete aggregate mixed with crumb rubber under elevated temperature. *Construction and Building Materials*, 222, 119-129. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.133>
- Saha, A. K. y Sarker, P. K. (2018). Durability of Mortar Incorporating Ferronickel Slag Aggregate and Supplementary Cementitious Materials Subjected to Wet-Dry Cycles. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 12(1), 29-40. <https://doi.org/10.1186/s40069-018-0264-5>
- Seymour, L. M., Maragh, J., Sabatini, P., Di Tommaso, M., Weaver, J. C. y Masic, A. (2023). Hot mixing: Mechanistic insights into the durability of ancient Roman concrete. *Science Advances*, 9(1), eadd1602. <https://doi.org/10.1126/sciadv.add1602>
- Sofi, A. (2018). Effect of waste tyre rubber on mechanical and durability properties of concrete – A review. *Ain Shams Engineering Journal*, 9(4), 2691-2700. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2017.08.007>
- Su, H., Yang, J., Ling, T. C., Ghataora, G. S. y Dirar, S. (2015). Properties of concrete prepared with waste tyre rubber particles of uniform and varying sizes. *Journal of Cleaner Production*, 91, 288-296. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.12.022>
- Tang, Y., Feng, W., Feng, W., Chen, J., Bao, D. y Li, L. (2021). Compressive properties of rubber-modified recycled aggregate concrete subjected to elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, 268, 121181 (1-11) <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121181>
- Thomas, B. S. y Gupta, R. C. (2015). Long term behaviour of cement concrete containing discarded tire rubber. *Journal of Cleaner Production*, 102, 78-87. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.04.072>

- Thomas, B. S., Gupta, R. C., Mehra, P. y Kumar, S. (2015). Performance of high strength rubberized concrete in aggressive environment. *Construction and Building Materials*, 83, 320-326. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.012>
- Ulewicz, M. (2021). Recycled Materials for Concrete and Other Composites. *Materials*, 14(9), 2279 (1-3). <https://doi.org/10.3390/ma14092279>
- Valente, M. y Sibai, A. (2019). Rubber/crete: Mechanical properties of scrap to reuse tire-derived rubber in concrete; A review. *Journal of Applied Biomaterials & Functional Materials*, 17(1), 1-8. <https://doi.org/10.1177/2280800019835486>
- Wang, Y., Chen, J., Gao, D. y Huang, E. (2018). Mechanical Properties of Steel Fibers and Nanosilica Modified Crumb Rubber Concrete. *Advances in Civil Engineering*, 2018, 1-10. <https://doi.org/10.1155/2018/6715813>
- Xu, J., Niu, X. y Yao, Z. (2021). Mechanical properties and acoustic emission data analyses of crumb rubber concrete under biaxial compression stress states. *Construction and Building Materials*, 298, 123778 (1-15).
- Xue, J. y Masanobu. (2013). Rubberized concrete: A green structural material with enhanced energy-dissipation capability. *Construction and Building Materials*, 42, 196-204. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.01.005>
- Yehia, S., Ibrahim, A. M. y Ahmed, D. F. (2023). The impact of using natural waste biopolymer cement on the properties of traditional/fibrous concrete. *Innovative Infrastructure Solutions*, 8(11), 287-300. <https://doi.org/10.1007/s41062-023-01253-z>
- Youssf, O., ElGawady, M. A., Mills, J. E. y Ma, X. (2014). An experimental investigation of crumb rubber concrete confined by fibre reinforced polymer tubes. *Construction and Building Materials*, 53, 522-532. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.12.007>
- Youssf, O., Hassanli, R., Mills, J. E. y Abd Elrahman, M. (2018). An experimental investigation of the mechanical performance and structural application of LECA-Rubcrete. *Construction and Building Materials*, 175, 239-253. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.184>

## CONTRIBUCIONES DE AUTORES/AS, FINANCIACIÓN Y AGRADECIMIENTOS

### Contribuciones de los/as autores/as:

**Conceptualización:** Julio Galvis, Libia Liliana; Figueredo Negrete, Fernando Antonio;  
**Análisis formal:** Julio Galvis, Libia Liliana; Figueredo Negrete, Fernando Antonio  
**Curación de datos:** Julio Galvis, Libia Liliana; Figueredo Negrete Fernando Antonio; Laguna Álvarez, Luis Carlos;  
**Redacción-Preparación del borrador original:** Julio Galvis, Libia Liliana  
**Redacción-Revisión y Edición:** Julio Galvis, Libia Liliana; Figueredo Negrete, Fernando Antonio; Laguna Álvarez, Luis Carlos;  
**Supervisión:** Julio Galvis, Libia Liliana  
**Administración de proyectos:** Julio Galvis, Libia Liliana; **Todos los/as autores/as han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito:** Julio Galvis, Libia Liliana; Figueredo Negrete Fernando Antonio; Laguna Álvarez, Luis Carlos.

**Financiación:** Esta investigación recibió financiamiento de la Corporación Universitaria Remington.

**Agradecimientos:** Los autores agradecen a la Corporación Universitaria Remington por la financiación del proyecto de investigación titulado “Determinación del grado de resistencia a la compresión y flexión que aportan al concreto el uso de fragmentos de residuos neumáticos”, con código 4000000313.

### AUTOR/ES:

#### Libia Liliana Julio Galvis

Corporación Universitaria Remington, Colombia.

Doctorado en Química, Químico, con área de actuación general en Ciencias exactas, Química, Fisicoquímica y Química Orgánica y con especialidad en Fisicoquímica Orgánica. Capacidad de abordar adecuadamente la determinación química cualitativa y cuantitativa en diversas matrices (alimentos, bebidas alcohólicas, agua potable). Experiencia en estudios enfocados en el desarrollo de agregados alternativos como opción de reemplazo total o parcial áridos naturales en la elaboración del concreto.

[libia.julio@uniremington.edu.co](mailto:libia.julio@uniremington.edu.co)

**Orcid ID:** <https://orcid.org/0000-0003-4213-1271>

**Google Scholar:** <https://scholar.google.com/citations?user=EBWcpGYAAAAJ&hl=es>

**ResearchGate:** <https://www.researchgate.net/profile/Libia-Julio>

**Fernando Antonio Figueredo Negrete**  
Corporación Universitaria Remington, Colombia.

Especialista en gerencia de proyectos, Químico, experiencia en la implementación de técnicas computacionales para la solución, la predicción y el reconocimiento de patrones complejos en problemas de investigación en química, física, biología, medicina o medio ambiente. Habilidades en el área de la tecnología y la optimización de los recursos disponibles para la planificación, diseño de experimentos y el manejo eficiente de volúmenes y procesamiento de datos.

[fernando.figueredo@uniremington.edu.co](mailto:fernando.figueredo@uniremington.edu.co)

**Orcid ID:** <https://orcid.org/0000-0002-8865-9672>

**Google Scholar:** <https://scholar.google.es/citations?hl=es&pli=1&user=0tfaL2QAAAAJ>

**ResearchGate:** <https://acortar.link/zMG1YJ>

**Luis Carlos Laguna Álvarez**  
Corporación Universitaria Remington, Colombia.

Estudiante VII semestre de Ingeniería Ambiental.  
Bachiller académico. Competencia lenguaje de programación MATLAB/Octave.  
Experiencia en formulación de proyectos participativos en contextos multiculturales.  
Participación en procesos de investigación formativa, análisis de resultados, redacción de carácter científico y toma de muestras de concreto en obra.

[luis.laguna.2179@miremington.edu.co](mailto:luis.laguna.2179@miremington.edu.co)

**Orcid ID:** <https://orcid.org/0009-0000-9626-0592>