





Diseño de block con caucho reciclado como alternativa sustentable Design of Concrete Block Using Recycled Rubber as a Sustainable Alternative

Diego Alberto Garnica-Monroy ^a, Iván Erick Castañeda-Robles ^{a,*}, Luis Daimir López-León ^a, Jesús Eduardo Hernández-Montesinos ^a

^a Área Académica de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42184, Pachuca, Hidalgo, México.

Resumen

El inadecuado manejo de llantas fuera de uso representa un problema ambiental creciente debido a su acumulación en vertederos clandestinos. En respuesta, la industria de la construcción busca alternativas sustentables mediante el reúso de residuos sólidos urbanos. Este estudio tiene como objetivo diseñar un bloque de concreto sostenible incorporando caucho reciclado como sustituto parcial del agregado fino. Se elaboraron tres mezclas con 0 %, 15 % y 25 % de caucho, evaluando su resistencia a compresión, peso y facilidad de moldeo. La mezcla con 15 % alcanzó 35.21 kg/cm² a los 28 días, cumpliendo con normas mínimas para elementos no estructurales y reduciendo su peso un 11.9 %. La mezcla con 25 % presentó deficiencias mecánicas. Los resultados muestran que es posible aprovechar residuos de llantas en bloques sustentables, mejorando el desempeño físico del producto y reduciendo su impacto ambiental. Esta propuesta representa una alternativa viable para mitigar el daño ecológico generado por neumáticos fuera de uso.

Palabras Clave: Caucho reciclado, bloques de concreto, residuos sólidos urbanos, sustentabilidad.

Abstract

The improper disposal of end-of-life tires poses a growing environmental concern due to their accumulation in illegal landfills. In response, the construction industry is exploring sustainable alternatives through the reuse of urban solid waste. This study aims to design a sustainable concrete block by partially replacing fine aggregate with recycled rubber. Three mixtures were prepared with 0%, 15%, and 25% rubber content, and tested for compressive strength, weight, and moldability. The 15% mix achieved 35.21 kg/cm² at 28 days, meeting minimum standards for non-structural elements while reducing weight by 11.9%. The 25% mix exhibited mechanical deficiencies. Results demonstrate the feasibility of using tire waste in sustainable blocks, enhancing physical performance and reducing environmental impact. This proposal offers a viable alternative to mitigate the ecological harm caused by discarded tires.

Keywords: Recycled rubber, sustainable blocks, urban solid waste, compressive strength.

1. Introducción

La creciente generación de residuos sólidos urbanos (RSU) en México representa una amenaza ambiental y social, particularmente en zonas urbanas donde la expansión demográfica y el consumo desmedido superan las capacidades municipales de gestión (Vidarte Rodríguez & Colmenares López, 2020). Entre los residuos de mayor impacto se encuentran las llantas fuera de uso (LFU), cuyo volumen, resistencia físico-química y lenta degradación —estimada en más de 500 años— las convierten en una fuente persistente de contaminación (Manuel et al., 2015). Su acumulación en

vertederos clandestinos genera focos de infección, incendios y emisiones de compuestos tóxicos, como hidrocarburos aromáticos policíclicos, monóxido de carbono y metales pesados, con consecuencias directas para la salud pública y el medio ambiente (Pacheco, 2023).

En el estado de Hidalgo, municipios como Pachuca y Mineral de la Reforma evidencian una falta estructural de estrategias de recolección, reciclaje y valorización de llantas, lo cual ha derivado en su disposición irregular en espacios públicos, lotes baldíos y cuerpos de agua (Gobierno del Estado de Hidalgo, 2022). Esta situación plantea un desafío crítico para la planeación urbana y la gestión ambiental, pues la

*Autor para la correspondencia: ivan_castaneda@uaeh.edu.mx

Correo electrónico: ga375976@uaeh.edu.mx (Diego Alberto Garnica Monroy), ivan_castaneda@uaeh.edu.mx (Iván Erick Castañeda Robles), luis_lopez@uaeh.edu.mx (Luis Daimir López León), he419886@uaeh.edu.mx (Jesús Eduardo Hernández Montesinos).

Historial del manuscrito: recibido el 19/08/2025, última versión-revisada recibida el 28/09/2025, aceptado el 26/10/2025, publicado el 05/12/2025.
DOI: <https://doi.org/10.29057/icbi.v13iEspecial3.15725>



presencia de llantas abandonadas propicia la proliferación de plagas, obstruye cauces naturales y deteriora la imagen urbana (Godínez, 2022).

Paralelamente, el sector de la construcción enfrenta su propia crisis ambiental debido a la sobreexplotación de agregados pétreos como arena y grava. Esta actividad provoca erosión acelerada, alteración de ecosistemas fluviales, reducción de zonas agrícolas y afectaciones en obras hidráulicas y viales, especialmente cuando se realiza sin regulación adecuada (Ravelo & Álvarez, 2019; Figueroa-Agurto, 2024). Además, la producción de concreto convencional representa una fuente considerable de emisiones de CO₂, derivadas tanto del proceso cementero como del transporte y procesamiento de agregados (Plaza et al., 2021).

Ante esta doble problemática, surge la necesidad de explorar soluciones constructivas sostenibles que promuevan la economía circular mediante la reutilización de residuos y la reducción del impacto ambiental de los materiales convencionales (ONU-Hábitat, 2021). En este contexto, el caucho reciclado proveniente de llantas representa una alternativa técnicamente viable como sustituto parcial del agregado fino. Este material aporta propiedades deseables como ligereza, absorción de impactos, resistencia química, aislamiento térmico y acústico, además de favorecer la durabilidad del producto en condiciones adversas (Herrera-Sosa et al., 2015; Fioriti et al., 2020).

Diversos estudios han explorado la incorporación de caucho reciclado en concretos con distintos fines constructivos. Por ejemplo, Lara Guerrero et al. (2020) y Castro Alay et al. (2020) analizaron la resistencia de mezclas con sustituciones parciales de caucho en concretos para pavimentos, reportando disminuciones moderadas en la resistencia a compresión y mejoras en el aislamiento térmico. Asimismo, Fioriti et al. (2020) demostraron que el caucho contribuye a la absorción de energía y la reducción del peso volumétrico del material. Sin embargo, la aplicación específica del caucho reciclado en bloques de mampostería no ha sido documentada, por lo que este trabajo busca cubrir dicho vacío mediante un análisis experimental enfocado en el desempeño mecánico y físico de un bloque no estructural elaborado con caucho triturado.

En este contexto, la Espectroscopía de Plasma Inducido por Láser (LIBS) es una técnica idónea para estudiar la interacción entre la matriz cementante y las partículas de caucho reciclado en concretos modificados, ya que permite identificar y mapear en tiempo real elementos característicos del cemento (Ca, Si, Al, Fe) y de la fase polimérica del caucho (C, H, S, Zn), lo que resulta especialmente útil en la caracterización de la zona de transición interfacial (ITZ). A través de esta herramienta es posible correlacionar la composición química local, incluidas variaciones en la relación Ca/Si del C-S-H y la presencia de aditivos residuales del caucho, con el desempeño mecánico y la durabilidad del material, aportando así evidencia científica para optimizar el diseño de concretos sostenibles con agregados reciclados (Cremers & Radziemski, 2013).

En consecuencia, el presente trabajo tiene como objetivo diseñar y caracterizar un bloque de concreto no estructural que incorpore caucho reciclado de llantas como sustituto parcial del agregado fino (15 %). Con ello se busca ofrecer una alternativa constructiva de bajo impacto ambiental, que conserve una resistencia adecuada y, a la vez, aporte ventajas en términos de aislamiento, peso y facilidad de manufactura.

Finalmente, desde una perspectiva científica y tecnológica, esta propuesta pretende contribuir a la innovación en materiales sostenibles, abordando de manera simultánea la gestión de residuos no biodegradables y la sobreexplotación de recursos pétreos. Así, se plantea una estrategia replicable y efectiva para la revalorización de residuos en el sector de la construcción, particularmente en contextos de vivienda social.

2. Metodología Experimental

Se utilizaron materiales seleccionados bajo criterios de calidad y normativa técnica para la elaboración de bloques de concreto con sustitución parcial del agregado fino por caucho reciclado. A continuación, se describen sus características, procedencia y condiciones de preparación, garantizando su compatibilidad con la mezcla y su desempeño en condiciones controladas de laboratorio.

2.1.1 Cemento

Se utilizó cemento Portland tipo I, un aglomerante hidráulico de uso general conforme a la norma NMX-C-414-ONNCCE-2004. Fue proporcionado por un proveedor local del estado de Hidalgo y seleccionado por su buena trabajabilidad y desempeño en condiciones estándar de exposición. Su función fue proporcionar cohesión, fraguado adecuado y resistencia mecánica tanto en la mezcla convencional como en las modificadas con agregados reciclados.

2.1.2 Agregado Grueso

Se empleó grava caliza triturada con tamaño máximo nominal de 19 mm, seleccionada por su geometría angular, que mejora el entrelazamiento mecánico en la matriz del concreto. Fue clasificada mediante un análisis granulométrico con base en la norma NMX-C-077-ONNCCE-1997.

2.1.3 Agregado Fino

Se usó arena natural de río, lavada y secada al ambiente durante 24 horas. Posteriormente fue tamizada conforme a NMX-C-111-ONNCCE-2014, utilizando mallas No. 4, 8, 16, 30, 50 y 100. El módulo de finura resultó ser 2.65, lo que indica una arena bien graduada, óptima para mezclas que requieren buena trabajabilidad.

2.1.4 Caucho Reciclado

El caucho reciclado se obtuvo de llantas automotrices fuera de uso (LFU) recolectadas en centros de acopio informales en Pachuca y Mineral de la Reforma, Hidalgo. Las llantas fueron trituradas mecánicamente hasta obtener partículas con granulometría menor a 5 mm (malla No. 4). La composición estimada fue: 60 % caucho vulcanizado, 14–15 % acero, 10 % negro de humo y trazas textiles. Se eligió este material por su baja densidad, absorción de impactos, estabilidad química y propiedades térmico-acústicas.

2.1.5 Agua

Se utilizó agua potable proveniente de la red pública, cumpliendo con la norma NMX-C-122-ONNCCE-2016. En todas las mezclas se aplicó una relación agua/cemento (A/C) de 0.75, buscando una consistencia homogénea y adecuada para moldeado manual. Se verificó mediante el ensayo de revenimiento (cono de Abrams), obteniéndose valores promedio de 5.5 cm, correspondientes a una consistencia plástica baja. Esta consistencia resultó adecuada para bloques moldeados manualmente y compactados mediante vibrado externo con mazo de goma, lo cual favorece la eliminación de vacíos sin comprometer la forma del molde.

Es importante señalar que, aunque la sustitución parcial del agregado fino por caucho implica diferencias en absorción, se mantuvo constante la relación agua/cemento (0.75) en todas las mezclas como criterio de control experimental. Este enfoque permitió aislar el efecto del caucho en las propiedades mecánicas, ya que el caucho de llanta posee propiedades hidrofóbicas naturales, lo que implica una baja afinidad con el agua y contribuye a la formación de una unión débil con la matriz cementante. Este efecto ha sido medido experimentalmente; por ejemplo, Chen et al. (2021) en *On Developing a Hydrophobic Rubberized Cement Paste* encontraron que el caucho sin tratar es hidrofóbico, y que éste dificulta la distribución del agua en la pasta de cemento, afectando el proceso de hidratación. Cuando el caucho es parcialmente oxidado para introducir grupos funcionales más hidrofílicos, se observa que mejora la interacción entre el caucho y la pasta, reduciendo esa barrera hidrofóbica. Así, en la práctica en este trabajo, la sustitución por caucho redujo la trabajabilidad (fluidez y consistencia) porque el caucho no absorbe agua como los agregados pétreos finos. La constancia en la relación a/c permitió comparar efectos, aunque no refleja el ajuste práctico que suele hacerse en obra para mejorar la trabajabilidad.

2.2. Diseño de mezclas

Se formularon tres mezclas, variando el porcentaje de caucho reciclado como sustituto del agregado fino:

- A. M1 (mezcla control): 0 % caucho
- B. M2: 15 % caucho
- C. M3: 25 % caucho

La elección de los porcentajes (15 % y 25 %) se fundamentó en estudios previos (Lara Guerrero et al., 2020; Castro Alay et al., 2020), que indican que estos rangos son críticos para mantener una resistencia mecánica mínima aceptable en aplicaciones no estructurales y aprovechar beneficios físicos como menor peso y aislamiento térmico.

Tabla 1: Mezclas de concreto con sus respectivos agregados.

| Mezcla | Porcentaje de caucho | Arena (kg) | Caucho (kg) | Cemento (kg) | Agua (litros) |
|--------|----------------------|------------|-------------|--------------|---------------|
| M1 | 0 % | 7.5 | 0 | 2.0 | 1.5 |
| M2 | 15 % | 6.375 | 1.125 | 2.0 | 1.5 |
| M3 | 25 % | 5.625 | 1.875 | 2.0 | 1.5 |

2.3. Elaboración de especímenes.

Se siguió un procedimiento estandarizado para asegurar condiciones homogéneas en la fabricación de los especímenes de concreto para ensayo. Las etapas se desarrollaron de forma cronológica y controlada bajo condiciones de laboratorio, como se describe a continuación:

1. Preparación de materiales:
Todos los materiales (arena, grava, caucho) fueron secados al ambiente durante 24 horas para evitar alteraciones en la relación agua/cemento. El caucho reciclado fue tamizado nuevamente para confirmar una granulometría menor a 5 mm.
2. Mezclado:
El mezclado fue manual, sobre una superficie limpia. Se incorporaron primero los materiales secos (arena, grava y caucho), después el cemento Portland tipo I, y finalmente el agua potable en pequeñas porciones. El mezclado se realizó durante 8–10 minutos hasta obtener una masa uniforme, sin grumos ni segregaciones visibles.
3. Moldeo:
La mezcla se vació en moldes cilíndricos metálicos de 10 cm de diámetro por 20 cm de altura (conforme a la NMX-C-037-ONNCCE-2013). El llenado se efectuó en tres capas, cada una compactada con 25 golpes de varilla metálica de 16 mm de diámetro. Para mejorar el asentamiento y evitar vacíos, se aplicó vibrado externo manual utilizando un mazo de goma sobre las paredes del molde.
4. Curado:
Tras un reposo inicial de 24 horas, los especímenes fueron desmoldados y sumergidos en agua a 23 ± 2 °C. El curado se realizó por 7, 14 y 28 días conforme a la NMX-C-156-ONNCCE-2012, garantizando una hidratación continua para el desarrollo óptimo de la resistencia mecánica.

2.4. Ensayos realizados

2.4.1. Resistencia a la compresión

En el presente estudio se utilizaron especímenes cilíndricos normados de 10 cm de diámetro por 20 cm de altura para la determinación de la resistencia a la compresión, con el propósito de analizar de manera controlada el efecto del caucho reciclado en la matriz cementante. No obstante, es pertinente señalar que la norma NMX-C-441-ONNCCE-2013 remite a la NMX-C-036-ONNCCE-2004, la cual establece que la resistencia a la compresión de los bloques de concreto debe determinarse directamente en los propios elementos, mediante muestras aleatorias y representativas de la producción. En este sentido, los resultados obtenidos en cilindros deben considerarse como una aproximación experimental que permite evaluar el comportamiento mecánico de la mezcla, pero no son equivalentes ni sustituyen las pruebas normalizadas en bloques. Por lo tanto, se reconoce como una limitación del presente trabajo la necesidad de realizar, en etapas posteriores, ensayos específicos en bloques conforme a la normativa aplicable, a fin de garantizar la comparabilidad y validez de los resultados en condiciones reales de uso.

Para cada mezcla (M1, M2 y M3) se prepararon tres cilindros por edad de curado, resultando en un total de 18 especímenes y se sometieron a los ensayos en una prensa de compresión simple de 130 ton/cm² de capacidad, marca Controls, en condiciones controladas de temperatura (22 ± 2 °C) y humedad (60 ± 5 %).

2.4.2. Peso seco

Después del curado, cada cilindro fue secado superficialmente y pesado con una balanza digital de precisión ± 0.01 kg para determinar el efecto del contenido de caucho sobre la masa del bloque. Los resultados permitieron comparar el comportamiento de densidad entre las mezclas y evaluar la viabilidad de los bloques en términos de ligereza estructural y facilidad de manejo en obra.

2.4.3. Ensayo de revenimiento

Se aplicó el ensayo de revenimiento con el objetivo de evaluar la trabajabilidad de las mezclas frescas, conforme a la norma NMX-C-156-ONNCCE-2012. Se utilizó un cono de Abrams y una varilla de acero de 16 mm de diámetro. Cada mezcla fue ensayada al momento de su preparación, arrojando los siguientes valores promedio de revenimiento:

- M1 (0 % caucho): 6.2 cm
- M2 (15 % caucho): 5.5 cm
- M3 (25 % caucho): 4.7 cm

La reducción progresiva en el revenimiento se atribuye a la mayor absorción de agua del caucho reciclado y su menor adherencia con la pasta cementante. No obstante, todos los valores se consideran aceptables para mezclas de consistencia plástica baja, adecuadas para bloques compactados manualmente mediante vibrado externo con mazo.

3. Resultados y Discusión

Este apartado presenta el análisis de los resultados obtenidos en los ensayos realizados sobre bloques de concreto fabricados con sustitución parcial del agregado fino por caucho reciclado proveniente de neumáticos. Se evaluaron tres mezclas: M1 (mezcla convencional sin caucho), M2 (con 15 % de caucho) y M3 (con 25 %). Los parámetros comparativos fueron la resistencia a la compresión a 14 y 28 días y el peso promedio por bloque. Estos datos permiten evaluar el impacto del caucho en el desempeño mecánico y funcional del bloque, así como su viabilidad para aplicaciones constructivas no estructurales.

3.1. Presentación de resultados

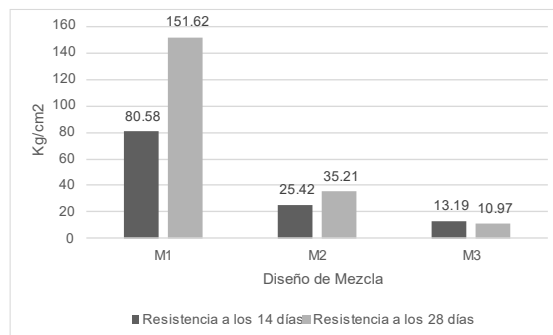
3.1.1. Resistencia a la compresión

La resistencia a la compresión se evaluó siguiendo lo establecido en la NMX-C-159-ONNCCE-2016. Las probetas fueron sometidas a ensayo a los 14 y 28 días de curado, y los resultados se resumen a continuación, ver Tabla 2.

Tabla 2: Resultados de resistencia a la compresión

| Mezcla | Porcentaje de caucho | Resistencia a 14 días (Kg/cm ²) | Resistencia a 28 días (kg/cm ²) |
|--------|----------------------|---|---|
| M1 | 0% (convencional) | 80.58 | 151.62 |
| M2 | 15% | 25.42 | 35.21 |
| M3 | 25% | 13.19 | 10.97 |

De este modo, los ensayos en cilindros permiten comprobar la viabilidad técnica de la mezcla, mientras que la normativa citada establece el marco de referencia indispensable para su extrapolación a elementos constructivos finales, asegurando que el producto cumpla con los criterios de desempeño y calidad exigidos en obra.



(C)

Figura 1. (A) Resultados de la resistencia a la compresión según el porcentaje de caucho, (B) máquina de compresión una prensa hidráulica marca Controls y (C) evidencia de cilindros evaluados en la máquina de compresión por triplicado, a 14 días de curado.

La gráfica muestra de forma clara la tendencia decreciente de la resistencia a la compresión a medida que aumenta la cantidad de caucho en la mezcla. La mezcla M1 (0 % caucho) presenta un incremento significativo entre los 14 y 28 días, reflejando una buena hidratación del cemento. En cambio, la mezcla M2 (15 %) muestra una ganancia moderada de resistencia, lo cual evidencia que, aunque el caucho interfiere parcialmente en el proceso de fraguado, aún permite obtener un producto con características aceptables. Por otro lado, la

mezcla M3 (25 %) presenta una disminución entre los 14 y 28 días, indicando una desestabilización en la matriz cementante provocada por un exceso de partículas elastoméricas, lo cual impide un desarrollo adecuado de la resistencia estructural del bloque.

Los resultados confirman que la incorporación de caucho reciclado disminuye la resistencia a la compresión del concreto, en línea con estudios como los de Soneco (2024) y Lara Guerrero et al. (2020), quienes documentaron una pérdida significativa de resistencia al aumentar el contenido de caucho debido a la baja adherencia entre este y la matriz cementicia.

La mezcla convencional (M1), sin incorporación de caucho, presentó los valores más altos de resistencia, alcanzando 80.58 kg/cm² a los 14 días y 151.62 kg/cm² a los 28 días, lo cual la posiciona muy por encima de los mínimos establecidos para bloques no estructurales (≥ 35 kg/cm²) según la NMX-C-441-ONNCE-2013.

En contraste, la mezcla M2 con 15 % de caucho mostró una resistencia a los 28 días de 35.21 kg/cm², apenas por encima del umbral mínimo normativo, lo que la hace viable solo para aplicaciones no estructurales. Por su parte, la mezcla M3 (25 % de caucho) evidenció los valores más bajos, incluso mostrando una reducción entre los 14 y 28 días (de 13.19 a 10.97 kg/cm²).

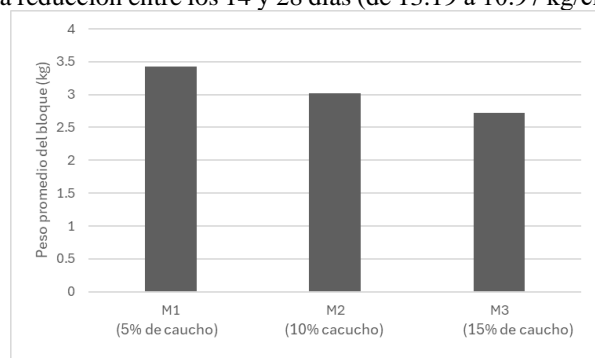


Figura 2: Variación del peso promedio según el porcentaje de caucho

3.1.2. Peso promedio de los bloques

El peso de los bloques de concreto se midió con el objetivo de identificar el efecto de la sustitución del agregado fino por caucho reciclado sobre la masa total del elemento. Esta propiedad es relevante ya que un menor peso puede representar ventajas logísticas, económicas y constructivas. Los resultados obtenidos se muestran a continuación, ver Tabla 3.

| Mezcla | Porcentaje de caucho | Peso promedio (Kg) |
|--------|----------------------|--------------------|
| M1 | 0% (convencional) | 3.43 |
| M2 | 15% | 3.02 |
| M3 | 25% | 2.72 |

La gráfica evidencia una tendencia descendente en el peso de los bloques conforme se incrementa el contenido de caucho. Este comportamiento se debe principalmente a la menor densidad del caucho comparado con el agregado fino tradicional, como lo documentan Calva-Alejo y Rojas-Caldelas (2014). La Mezcla 1, que representa el bloque convencional sin caucho, mostró un peso promedio de 3.43 kg.

Al incorporar 15 % de caucho (Mezcla 2), el peso disminuyó a 3.02 kg, representando una reducción del 11.9 %. Con un 25 % de caucho (Mezcla 3), el peso bajó aún más a 2.72 kg, equivalente a una reducción del 20.7 %.

Estos resultados refuerzan la utilidad del caucho reciclado como un componente funcional para aligerar elementos de concreto, sin necesidad de modificar drásticamente el proceso de producción. Esta característica puede aportar beneficios como: reducción de carga muerta sobre estructuras, facilidad de colocación, y potencial disminución en costos de transporte y manejo en obra.

Además, al integrarse en productos no estructurales, el uso del caucho reciclado favorece soluciones constructivas más sostenibles y acordes a principios de eficiencia material. Diversos estudios han validado esta ventaja competitiva en aplicaciones como paneles divisorios, tabiques ornamentales y piezas para sistemas modulares prefabricados (Sánchez et al., 2022; López-Guzmán et al., 2021).

Así, la reducción de peso alcanzada no solo es cuantitativamente significativa, sino que cualitativamente se traduce en una mejor adaptabilidad del bloque para entornos urbanos donde se prioriza la ligereza sin comprometer funcionalidad.

3.2. Comparación entre bloques tradicionales y bloques con caucho

El comportamiento de la mezcla M1 refleja las características típicas de un concreto convencional: alta resistencia y peso adecuado para elementos estructurales. En comparación, la mezcla M2 (15 % caucho) logra un equilibrio interesante, ya que, aunque sacrifica resistencia, gana en ligereza, lo que la hace adecuada para aplicaciones no estructurales. En cambio, la mezcla M3 presentó resistencia deficiente e inestable, lo que limita severamente su aplicación constructiva.

Desde una perspectiva técnica:

- M1 → Alta resistencia, peso convencional, aplicación estructural
- M2 → Resistencia mínima aceptable, buena reducción de peso, aplicación no estructural viable
- M3 → Baja resistencia, buena ligereza, aplicación restringida a elementos decorativos o auxiliares

3.3. Discusión técnica de los efectos del caucho en la mezcla

La inclusión de caucho reciclado modifica significativamente la estructura interna del concreto. Diversos factores explican la pérdida de resistencia:

- Baja adherencia entre las partículas de caucho y la pasta cementante, lo que genera puntos débiles en la matriz
- Mayor cantidad de vacíos debido a la forma y textura del caucho, afectando la compacidad
- Elasticidad inherente del caucho, que actúa como zona de amortiguamiento y no como transmisor de carga

A pesar de ello, las ventajas no deben subestimarse. El caucho aporta:

- Ligereza (útil en obras prefabricadas y zonas sísmicas)
- Potencial aislamiento térmico y acústico

- Reducción del impacto ambiental, al reutilizar residuos que tardan más de 500 años en degradarse (Herrera-Sosa et al., 2015)

El comportamiento observado confirma que existe un límite de sustitución óptimo, en este caso, el 15 %, que permite mantener un nivel funcional de resistencia sin comprometer otras propiedades deseables.

3.4. Referencias cruzadas con estudios previos

La tendencia obtenida coincide con investigaciones anteriores que han evaluado la incorporación de caucho en mezclas cementicias, ver Tabla 4.

Tabla 4: Comparación de la resistencia a compresión en bloques con caucho reciclado según diversos estudios.

| Estudio | Porcentaje de caucho | Resistencia a 28 días (Kg/cm ²) | Conclusión |
|-----------------------------|----------------------|---|--|
| Presente estudio (M2) | 15% | 35.21 | Viable para uso no estructural. |
| Lara Guerrero et al. (2020) | 15% | 50.60 | Buen equilibrio entre resistencia y ligereza. |
| Soncco (2023) | 25% | <40.00 | Disminución mecánica severa. |
| Fioriti et al. (2020) | 18% | ~60.00 | Disminución aceptable, mayor absorción de energía. |
| Castro Alay et al. (2020) | 10-15% | 45-55 | Rendimiento adecuado, recomendación en bloques livianos. |

En todos los casos, se observa una tendencia decreciente en la resistencia conforme se incrementa el porcentaje de caucho, respaldando el hallazgo central de este estudio: el 15 % de caucho representa el límite técnico recomendable para aplicaciones no estructurales.

3.5. Cohesión Matriz-Caucho: Análisis Microestructural Post-Compresión de Concretos Sostenibles

Con el objetivo de evaluar la interacción entre la matriz cementante y el caucho reciclado en la mezcla, se realizó un análisis microscópico de las muestras con aumentos de 20X, 50X, 100X y 200X, considerando tres composiciones distintas: M1 (0%), M2 (15%) y M2 (25%) de sustitución de agregado fino por caucho triturado.

En la muestra M1 (0%), correspondiente al concreto convencional, Se logra observar una matriz homogénea y densamente compactada, con los agregados minerales perfectamente embebidos en la pasta de cemento. La ausencia de vacíos relevantes y la continuidad en la interfaz agregados-

matriz confirman una hidratación óptima y una excelente cohesión interna.



Figura 3: Microestructura del concreto convencional (M1-0% caucho).

Para la muestra M2 (15%), la matriz conserva su integridad general, aunque aparecen microespacios aislados alrededor de los fragmentos de caucho. Estas pequeñas zonas muestran una ligera discontinuidad en la unión caucho-cemento, reflejando la distinta rigidez del polímero. Sin embargo, la distribución del caucho en la estructura es uniforme y las grietas detectadas permanecen por debajo del umbral crítico para la resistencia a compresión.



Figura 4: Microestructura del concreto con agregado parcial fino de caucho (M2-15% caucho).

En la muestra M3 (25%), El caucho ocupa mayor volumen e introduce zonas de transición más anchas. Se identifican microgrietas interfaciales y poros coalescentes, producto de la menor rigidez y la baja energía superficial del caucho, aunque la matriz sigue cohesionada en el resto del sistema. Estas discontinuidades son gestionables mediante ajustes de dosificación o tratamiento superficial del caucho.



Figura 5: Microestructura del concreto con agregado parcial fino de caucho (M3-25% caucho).

Las microgrietas identificadas se mantienen por debajo del umbral crítico y no deterioran la continuidad de la pasta ni su adherencia al caucho; el polímero se distribuye homogéneamente y ocupa su volumen previsto sin generar vacíos estructuralmente relevantes. En conjunto, la

microestructura confirma una adecuada conformación y cohesión de la matriz cemento-caucho, incluso con sustituciones elevadas. Las leves discontinuidades observadas pueden mitigarse mediante ajustes de dosificación o la aplicación de agentes de compatibilización, preservando así las ventajas de ligereza, reaprovechamiento de residuos y aislamiento termoacústico del material para aplicaciones no estructurales.

3.6. Análisis espectroscópico de la muestra con 25% de caucho mediante LIBS (Espectroscopía de Plasma Inducido por Láser).

Con el fin de caracterizar la composición superficial del concreto modificado con residuos de caucho, se seleccionó una muestra cilíndrica correspondiente a la mezcla con 25% de sustitución de agregado fino por caucho reciclado. La muestra fue analizada mediante el sistema KEYENCE EA-300 VHX Series, empleando la técnica de espectroscopía de emisión inducida por láser (LIBS).

En la primera etapa, se ejecutó un análisis multipunto de 25 zonas distintas distribuidas en la superficie del espécimen. Los resultados identificaron mayoritariamente la presencia de compuestos de calcio y silicio, lo cual indica que, a pesar de la adición de caucho, la matriz cementante conserva sus principales elementos constituyentes (ver figura 6). Esto refuerza la compatibilidad química del caucho con el concreto, al no alterar significativamente la composición mineralógica del material base.

Posteriormente, se realizó un segundo barrido enfocado en detectar zonas específicas con presencia de caucho, mapeando los puntos que presentaban altas concentraciones de carbono (C) e hidrógeno (H), elementos típicos de compuestos orgánicos. Las áreas donde se detectaron proporciones elevadas de C (hasta 93.5%) y H (hasta 100%) fueron clasificadas como "compuesto orgánico (organic compound)" e "hidrógeno (hydrogen)", confirmando la localización del caucho dentro de la matriz del concreto (ver figura 7).

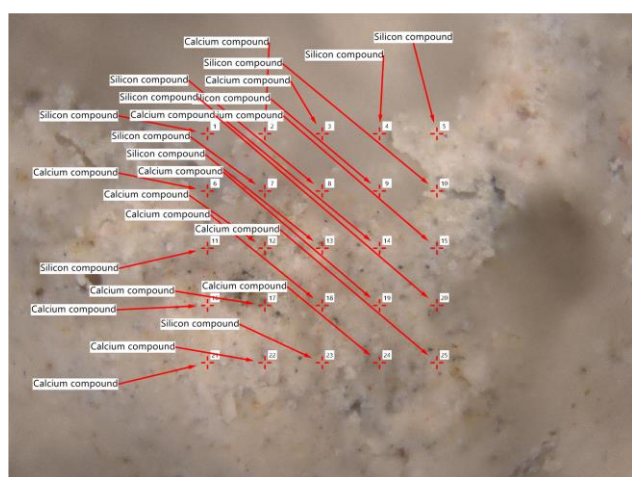


Figura 6: Mapa generado mediante Espectroscopía de Plasma Inducido por Láser. Se identifican predominantemente compuestos de calcio y silicio sobre la matriz cementante.

La imagen generada en este segundo análisis muestra la distribución espacial del caucho en la superficie escaneada, lo cual permitió verificar su dispersión e integración en la mezcla. Estos hallazgos son relevantes, ya que demuestran que el

caucho se encuentra embebido en el material, manteniendo contacto con la matriz cementante sin evidencia de incompatibilidades superficiales (ver figura 7).



Figura 7: Imagen obtenida por Espectroscopía de Plasma Inducido por Láser, mostrando puntos con altas concentraciones de carbono e hidrógeno, confirmando la localización del caucho dentro del concreto.

La interacción entre la matriz cementante y las partículas de caucho reciclado en concretos modificados puede comprenderse mejor al considerar sus respectivas naturalezas moleculares. El concreto convencional desarrolla una microestructura dominada por productos de hidratación del cemento, principalmente los silicatos de calcio hidratados (C-S-H), que actúan como fase cohesiva y proporcionan la resistencia mecánica (ver figura 6). En contraste, los neumáticos modernos suelen contener una mezcla de varios cauchos sintéticos ((C₄H₆)_n, C₈H₈, C₄H₆, C₅H₈, C₃H₃N, C₄H₈ y (C₄H₆)_n) y naturales por cadenas poliméricas ((C₅H₈)_n), todos derivados de monómeros orgánicos. A partir de sus estructuras se deducen los elementos químicos predominantes (C, H, S, O), lo que se confirma con los resultados del análisis elemental por espectroscopia de plasma inducido por láser (ver figura 7). Lo que en su conjunto le confiere elasticidad, hidrofobicidad y resistencia química.

Estas diferencias estructurales generan una zona de transición interfacial (ITZ) débil entre el caucho y la pasta cementicia: mientras que la matriz mineral es rígida e hidrofílica, el caucho es flexible e hidrofóbico. Esta incompatibilidad molecular puede resultar en la formación de microgrietas y vacíos en la ITZ, lo que afecta negativamente el comportamiento mecánico del material. Estudios recientes como el de Ji y Xia en 2025, han confirmado que la naturaleza hidrofóbica del caucho dificulta la adhesión entre las partículas de caucho y la matriz cementante, contribuyendo a una ITZ más frágil y, en consecuencia, a una menor resistencia a la compresión del concreto modificado con caucho reciclado.

4. Conclusiones

La investigación confirma que el bloque de concreto con caucho reciclado es no solo técnicamente viable, sino estratégicamente relevante para la edificación sostenible. Los resultados experimentales muestran que, con una sustitución de hasta el 15 % de agregado fino por caucho triturado, el

material mantiene la resistencia mínima requerida para elementos no estructurales, mientras reduce su peso en torno a un doce por ciento. Esta reducción facilita el transporte, la manipulación en obra y disminuye las cargas muertas que actúan sobre cimentaciones y losas, lo que puede traducirse en ahorros adicionales de acero y hormigón.

Desde la perspectiva microestructural, la pasta cementante se conforma adecuadamente alrededor de las partículas de caucho, sellando microhuecos y limitando la propagación de fisuras. Las microgrietas observadas permanecen por debajo de la longitud crítica para propagación frágil y pueden mitigarse con aditivos superplastificantes o mediante tratamientos superficiales del polímero. Además, la naturaleza hidrofóbica del caucho contribuye a la durabilidad del bloque al reducir la absorción de agua y mejorar la resistencia frente a ciclos de congelación-deshielo, lo que sugiere una vida útil comparable a la de un bloque convencional cuando se utiliza como cerramiento.

El impacto ambiental del bloque propuesto es significativo. Al incorporar neumáticos fuera de uso en la mezcla se evita que un residuo altamente persistente llegue a vertederos o sea quemado a cielo abierto, prácticas asociadas a la emisión de compuestos tóxicos y metales pesados. La sustitución parcial del árido fino también reduce la demanda de arena natural y, con ella, la presión sobre cauces y bancos de material, contribuyendo a la preservación de ecosistemas fluviales.

En cuanto a su aplicación, el bloque con caucho reciclado se adapta especialmente bien a muros divisorios, cerramientos ligeros y paneles modulares prefabricados. Su menor densidad, junto con la capacidad de amortiguar vibraciones y proporcionar aislamiento térmico y acústico, lo convierte en un material atractivo para entornos urbanos densos y para proyectos que busquen optimizar la eficiencia energética. Además, su producción encaja con los lineamientos de economía circular al transformar un pasivo ambiental en un recurso valioso, generando oportunidades de empleo verde en las etapas de recolección, triturado y manufactura.

Si bien persisten retos, como la mejora de la zona de transición caucho-matriz en porcentajes de sustitución superiores al 15 % y la evaluación de durabilidad a muy largo plazo. En conjunto, el bloque con caucho se perfila como un material clave en la transición hacia edificaciones más responsables y eficientes, convirtiendo un pasivo ambiental en un activo que impulsa la construcción verde.

Referencias

- Aguilar, J. D. (2023). Contaminación ambiental por la inadecuada gestión de llantas usadas por el parque automotor del municipio de Villavicencio – Meta, Colombia. [Proyecto de investigación]. Repositorio Institucional UNAD. <https://repository.unad.edu.co/handle/10596/54711>
- Calva-Alejo, C. L., & Rojas-Caldelas, R. I. (2014). Diagnóstico de la Gestión de Residuos Sólidos Urbanos en el Municipio de Mexicali, México: Retos para el Logro de una Planeación Sustentable. *Información tecnológica*, 25(3), 59–72. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642014000300009>
- Chen, C.-Y., Shen, Z.-Y., & Lee, M.-T. (2021). On Developing a Hydrophobic Rubberized Cement Paste. *Materials*, 14(13), 3687. <https://doi.org/10.3390/ma14133687>
- Cremers, D. A., & Radziemski, L. J. (2013). *Handbook of laser-induced breakdown spectroscopy*. John Wiley & Sons.
- Figuerola-Agurtu, G. A. (2024). Interferencia en las competencias otorgadas a los Gobiernos Autónomos Descentralizados del Ecuador en la autorización de explotación de áridos y pétreos en los lechos de los ríos del cantón Catamayo. *MQRInvestigar*, 8(4), 2001–2022. <https://doi.org/10.56048/MQR20225.8.4.2024.2001-2022> (researchgate.net)
- Gobierno del Estado de Hidalgo. (2023, 1 de enero). Periódico Oficial del Estado de Hidalgo: Tomo CLV, Alcance 41, Núm. 52. https://periodico.hidalgo.gob.mx/?tribe_events=Periodico-Oficial-Alcance-41-del-01-de-enero-de-2023
- Godínez, L. (2022, 25 de septiembre). Convierten en basurero camino y puente de Mineral de la Reforma. AM. <https://www.am.com.mx/zona-metropolitana/2022/9/25/convierten-en-basurero-camino-puente-de-mineral-de-la-reforma-624658.html>
- Ji, Y., Xia, Q. Probing mechanical attributes and microstructural ties in modified concrete blended with recycled rubber and straw powder. *Sci Rep* 15, 8191 (2025). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-91009-9>
- Lara Guerrero, E. J., Guerrero Cuasapaz, D. P., & Altamirano León, B. I. (2020). Influencia de las partículas de caucho en la resistencia a la compresión de bloques de concreto. *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería, Universidad del Zulia*, 43(3), 134-141. <https://doi.org/10.22209/rt.v43n3a03>
- Manuel, B. F., Carlos, D. M. J., Javier, O. A., Jenny, A., Javier, U. G., & Melgar, A. (2015). Reutilización de llantas para la elaboración de muebles. *Univ. Cienc. Soc.* [online]. 2015, n.15, pp. 60-63. ISSN 8888-8888.
- NMX-C-159-ONNCCE-2016. (2016). Industria de la construcción-concreto-elaboración y curado de especímenes de ensayo.
- NMX-C-441-ONNCCE-2013, Industria de la Construcción – Mampostería – Bloques, tabiques o ladrillos y tabicones para uso no estructural – Especificaciones y métodos de ensayo.
- NMX-C-036-ONNCCE-2004 - Industria de la construcción - Bloques, tabiques o ladrillos, tabicones y adoquines - Resistencia a la compresión - Método de prueba.
- ONU-Habitat & OS City. (2020). Consulta de Ciudades Sostenibles: Informe de resultados (versión comprimida V2). ONU-Habitat. https://unhabitat.org/sites/default/files/2020/07/reporte_onu-v2_compressed.pdf
- Plaza, P., Sáez del Bosque, I. F., Frías, M., Sánchez de Rojas, M. I., & Medina, C. (2021). Use of recycled coarse and fine aggregates in structural eco-concretes: Physical and mechanical properties and CO₂ emissions. *Construction and Building Materials*, 285, Article 122926. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122926>
- Ravelo García, Alicia & Alvarez, Adriana. (2019). Propuesta de norma técnica ambiental para la extracción de pétreos en Baja California: Caso de estudio Arroyo Las Palmas.
- Trujillo Angulo, A. C. (2024). Análisis del ciclo de vida de los residuos sólidos de llantas de un proceso de valorización a partir de criterios socioeconómicos y ambientales en la ciudad de Bogotá D.C. [Tesis de maestría, Fundación Universidad de América]. Repositorio Institucional Lumieres
- Vidarte Rodríguez, A., & Colmenares López, M. G. (2020). Basura Cero. Gestión de residuos sólidos urbanos en México. *RICSH Revista Iberoamericana de las Ciencias Sociales y Humanísticas*, 9(18), 130-150. <https://doi.org/10.23913/ricsh.v9i18.217>