DESDE 2013
https://repository.uaeh.edu.mx/revistas/index.php/icbi/issue/archive
Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI

ISSN: 2007-6363

Publicación Semestral Pädi Vol. 14 No. Especial 3 (2026) 360-369

Concreto con caucho reciclado para rodamiento: resistencia a compresión

Recycled-Rubber Concrete for Surface Courses: Compressive Strength

A. Meneses-Valencia[a], H.I. Navarro-Gómez[a], C. Rodríguez-Álvarez[a,*], J.E. Cerón-Carballo[a]

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

Resumen

El estudio evaluó comparativamente la resistencia a la compresión de un concreto patrón y de una mezcla identificada en los registros disponibles con 5 % en masa de caucho reciclado como sustitución parcial del agregado fino, con aplicación potencial en superficies de rodamiento. Los especímenes se evaluaron a 7, 14 y 28 días. Los valores reportados para el concreto patrón fueron 159, 238 y 266 kgf/cm², respectivamente, mientras que la mezcla con 5% de caucho registró 165, 244 y 271 kgf/cm². Las diferencias descriptivas fueron de +3.77%, +2.52% y +1.88% a 7, 14 y 28 días. Debido a que no se dispone de trazabilidad suficiente para verificar ensayos adicionales, la interpretación se limita a la resistencia a la compresión y no se atribuyen mejoras en módulo de elasticidad, flexión, durabilidad, impacto o trabajabilidad. Los resultados sugieren que, en el conjunto de datos reportado, la incorporación nominal de 5% de caucho mantuvo la resistencia a la compresión en un nivel comparable al concreto patrón; su empleo en superficies de rodamiento requiere validación adicional mediante ensayos específicos de desempeño y durabilidad.

Palabras clave: caucho reciclado, concreto, resistencia a la compresión, pavimentos, economía circular.

Abstract

The study comparatively evaluated the compressive strength of a control concrete and a mixture identified in the available records, in which 5% by mass of the fine aggregate was replaced with recycled rubber, with potential application in pavement surfaces. The specimens were evaluated at 7, 14, and 28 days. Reported values for the control concrete were 159, 238, and 266 kgf/cm², respectively, whereas the 5% rubber mixture reached 165, 244, and 271 kgf/cm². The corresponding descriptive differences were +3.77%, +2.52%, and +1.88%. Because sufficient traceability is not available to verify additional tests, the interpretation is restricted to compressive strength and no improvement is attributed to elastic modulus, flexural response, durability, impact behavior, or workability. Within the reported dataset, the nominal 5% rubber mixture maintained compressive strength at a level comparable to the control concrete; its use in surface courses requires further validation through specific performance and durability tests.

Keywords: recycled rubber, concrete, compressive strength, pavements, circular economy.

1. Introducción

El manejo de neumáticos fuera de uso constituye un problema ambiental de escala global. Se estima que cada año se descartan más de 1.5 mil millones de neumáticos; debido a la estructura vulcanizada del caucho, estos residuos presentan alta resistencia a la degradación y pueden permanecer durante periodos prolongados si no se valorizan adecuadamente. Los acopios, además de ocupar espacio, pueden retener agua y favorecer la proliferación de vectores, y representan un riesgo de incendio y de liberación de contaminantes (Zheng et al., 2022; Peláez Arroyave et al., 2017).

Ante este contexto, resulta necesaria la búsqueda de rutas de valorización. El caucho reciclado ha sido estudiado en materiales compuestos, asfaltos y matrices cementantes, entre otras aplicaciones, lo que permite aprovechar parte de este residuo y disminuir su disposición final (Peláez Arroyave et al., 2017).

*Autor para la correspondencia: profe_7479@uaeh.edu.mx
Correo electrónico: me360495@uaeh.edu.mx (Andrea Meneses-Valencia), humberto_navarro@uaeh.edu.mx (Humberto Ivan Navarro-Gómez), profe_7479@uaeh.edu.mx (Cutberto Rodríguez-Álvarez), jesus_ceronc@uaeh.edu.mx (Jesús Emmanuel Cerón-Carballo)

Historial del manuscrito: recibido el 21/05/2026, última versión revisada recibida el 02/10/2026, aceptado el 06/10/2026, publicado el 06/11/2026. **DOI:** https://doi.org/10.29057/icbi.v14iEspecial3.17945

Una de las alternativas más prometedoras es la reutilización de caucho reciclado en la fabricación de concreto estructural, un material ampliamente utilizado en la construcción.

En matrices cementantes, la literatura reciente muestra que la incorporación de caucho puede modificar la respuesta mecánica y funcional del concreto; el efecto depende de la dosificación, del tamaño de partícula, del tratamiento superficial y de la interacción pasta-caucho, por lo que no debe asumirse una mejora general de sus propiedades (He et al., 2023; Liu et al., 2024; Keleş et al., 2024).

Esto tiene implicaciones significativas para la sostenibilidad de la construcción, ya que contribuye tanto a la reducción de residuos como a la optimización del uso de los recursos.

En México, el problema de los neumáticos desechados se ha intensificado debido al rápido crecimiento del parque vehicular y la falta de políticas adecuadas para gestionar su desecho. Esta situación ha llevado a la acumulación de neumáticos en vertederos y en áreas urbanas no preparadas para su adecuada disposición, con el consiguiente impacto negativo en el medio ambiente y en la salud pública (Farfán & Leonardo, 2018).

De hecho, la industria de la construcción enfrenta un desafío similar: la creciente demanda de infraestructura ha llevado a un uso excesivo de agregados naturales, como arena y grava, en la producción de concreto, lo que contribuye al agotamiento de estos recursos (Gupta & Kua, 2017; Helmy et al., 2023).

La incorporación de caucho reciclado en el concreto no solo tiene beneficios ambientales, como la reducción de la demanda de agregados naturales, sino que también puede mejorar el rendimiento del material en aplicaciones específicas, al incrementar la capacidad de absorción de impactos, la disipación de energía y la deformabilidad, propiedades particularmente útiles en estructuras sujetas a cargas dinámicas, como capas de rodamiento y elementos expuestos a solicitaciones repetidas.

Además, se ha reportado que el caucho puede contribuir a mejorar el desempeño acústico del concreto, lo que amplía su potencial de aplicación en barreras sonoras y en otras soluciones urbanas orientadas a la reducción del ruido (Fadiel et al., 2023; Liu et al., 2024; Ganjian et al., 2009).

No obstante, el desempeño de soluciones con caucho en pavimentos ha mostrado resultados heterogéneos cuando existe exposición significativa a humedad y lluvia intensa, particularmente por mecanismos de daño inducido por humedad asociados a pérdida de adhesión/interfase y degradación progresiva del material bajo tránsito.

En mezclas asfálticas modificadas con caucho, el stripping (desprendimiento del ligante respecto al agregado) y el incremento de permeabilidad pueden acelerar deterioros como desgranamiento, baches y pérdida de integridad estructural cuando se combina humedad persistente con cargas repetidas, lo que obliga a controlar la susceptibilidad a la humedad desde el diseño y la verificación de desempeño (El-Zohairy et al., 2023; Malluru et al., 2025; Osman et al., 2024).

En materiales cementicios con adición de caucho, se ha reportado que la zona de transición interfacial (ITZ) tiende a ser más porosa y débil si el caucho se incorpora sin tratamiento, lo que puede incrementar rutas de ingreso de agua y afectar propiedades asociadas a durabilidad; por ello, se han propuesto tratamientos de superficie (p. ej., alcalinos, recubrimientos cementicios o agentes de acoplamiento) para mejorar la adherencia y la microestructura en torno al caucho (Jiang, 2021; Roychand, 2021; Shahzad & Zhao, 2022).

En consecuencia, además de evaluar resistencia y comportamiento mecánico, resulta crítico discutir el desempeño potencial bajo condiciones de humedad, y la necesidad de controles de adherencia/interfase y permeabilidad para aplicaciones en vías con tránsito y exposición climática.

El presente estudio se enfoca en comparar la resistencia a la compresión de un concreto patrón y una mezcla con incorporación de masa nominal de 5% de caucho reciclado, considerando su posible aplicación futura en superficies de rodamiento. El alcance experimental verificable se limita a la respuesta a compresión a 7, 14 y 28 días; por ello, la viabilidad para servicio en pavimentos se discute como una posibilidad que requiere ensayos adicionales de flexión, abrasión, durabilidad y exposición a humedad.

Esta investigación también busca contribuir a la reducción del uso de recursos naturales, apoyando así la economía circular y fomentando prácticas de construcción más sostenibles y eficientes (Segre & Joekes, 2000; Sherbini & Abou El-Mal, 2025). Al abordar simultáneamente la problemática de la acumulación de neumáticos y la explotación de recursos naturales para la construcción, este estudio pretende ofrecer una solución integral y efectiva a algunos de los desafíos ambientales más críticos de nuestro tiempo.

2. Estado del arte

Las investigaciones sobre el uso de caucho reciclado en el concreto han permitido avanzar significativamente en la comprensión del comportamiento de este material, lo cual se relaciona directamente con los antecedentes del problema de la acumulación de neumáticos desechados y de la falta de una gestión eficiente de residuos.

En este contexto, diversos estudios han empleado metodologías experimentales para determinar las propiedades mecánicas y físicas del concreto modificado con caucho, como la resistencia a la compresión, a la flexión y a la tracción, lo que permite evaluar su rendimiento frente a las mezclas convencionales (Keleş et al., 2024; Guo et al., 2017).

2.1. Problemática

Como ya se comentó, la acumulación de residuos de neumáticos se ha convertido en un problema ambiental crítico, relacionado con el incremento de la producción automotriz y la falta de biodegradabilidad del caucho (Farfán & Leonardo, 2018).

Este problema, además de generar contaminación del aire y del suelo, se asocia con el agotamiento de recursos debido a la necesidad de materiales vírgenes para la construcción (Helmy et al., 2023). En este contexto, el uso de caucho reciclado en concreto se presenta como una solución potencial que no solo contribuye a mitigar el impacto ambiental, sino que también podría aliviar la presión sobre los recursos naturales.

2.2. Beneficios y oportunidades del uso de caucho reciclado

La incorporación de caucho reciclado en el concreto se considera una oportunidad viable para mitigar la acumulación de residuos y reducir la demanda de agregados vírgenes.

Varios estudios han reportado que el caucho reciclado puede modificar la capacidad de absorción de impactos, la deformabilidad y otras propiedades del concreto, aunque la magnitud y el sentido del efecto dependen de la dosificación y de las características del material (Fadiel et al., 2023; Liu et al., 2024; Thomas et al., 2016). Estos antecedentes justifican la necesidad de ampliar en trabajos futuros el programa experimental más allá de la resistencia a la compresión.

2.3. El ámbito internacional

El uso de caucho reciclado en la producción de concreto mantiene un interés internacional creciente debido a su potencial para reducir residuos, disminuir el consumo de agregados naturales y ampliar las aplicaciones de concreto sostenible; no obstante, persisten retos vinculados a la disminución de la resistencia mecánica y la durabilidad, así como a la falta de estandarización técnica para su adopción a gran escala (Gandel et al., 2024; Helmy et al., 2023).

Los antecedentes del proyecto reconocen que México se enfrenta a problemas similares a nivel mundial, y la integración de prácticas exitosas en el uso del caucho reciclado, validadas en otras regiones, es una oportunidad para mejorar la gestión de residuos y la construcción sostenible en el país.

La discusión del proyecto considera métodos internacionales reportados para el procesamiento e incorporación de caucho en matrices cementantes; sin embargo, el análisis experimental de este manuscrito se restringe a los resultados de resistencia a la compresión que cuentan con valores reportados para la mezcla patrón y la mezcla con 5% de caucho.

2.4. Normativas y retos de implementación

Uno de los principales desafíos para la implementación del caucho reciclado en matrices cementantes es la ausencia de especificaciones prescriptivas ampliamente consolidadas que establezcan rangos de sustitución, tratamientos del caucho, control del agua y criterios mínimos de desempeño orientados a la durabilidad en condiciones de servicio exigentes.

La literatura coincide en que el comportamiento del material depende críticamente de la interfaz pasta–caucho (interfacial transition zone, ITZ), la rugosidad superficial, la presencia de contaminantes y el contenido de aire incorporado, lo que introduce variabilidad si no se controlan los procedimientos de preparación y aceptación del material (Ahmad, 2022; Assaggaf et al., 2021).

En aplicaciones de rodamiento expuestas a la humedad recurrente, el desempeño puede deteriorarse por mecanismos asociados a la absorción, al debilitamiento de la adherencia en la interfaz y al daño progresivo por la presencia de agua, particularmente cuando el caucho no recibe acondicionamiento superficial o cuando no se ajusta el diseño de mezcla para compensar la menor afinidad del caucho con la pasta cementante (Surehali et al., 2023; Roychand, 2021; Moolchandani & Sharma, 2025; Agrawal et al., 2023).

Por ello, más que depender de "recetas" únicas, se recomienda adoptar criterios de aceptación basados en el desempeño (resistencia, módulo, abrasión/escoriación superficial y durabilidad frente a la exposición al agua), acompañados de la trazabilidad del caucho (granulometría, limpieza y tratamiento) y del control de fabricación y curado, como condición para una adopción segura en infraestructura sometida a tránsito vehicular (Kilani et al., 2025)

2.5. Identificación de oportunidades y aportes innovadores

Se han identificado áreas de oportunidad específicas, como la combinación de caucho reciclado con otros materiales reciclados para maximizar sus beneficios en términos de resistencia y durabilidad (Gupta & Kua, 2017).

Estos antecedentes permiten contextualizar el uso de caucho reciclado en concreto y muestran la necesidad de controlar la dosificación, la granulometría y la interfaz pasta-caucho. En el presente trabajo, la comparación experimental se limita a la mezcla patrón y a la mezcla con la sustitución del 5% de la muestra por caucho para evitar extrapolar resultados no documentados.

Estos aspectos se emplearon como marco de discusión. La evidencia experimental utilizada para sustentar las conclusiones del presente manuscrito corresponde únicamente a los valores reportados de resistencia a la compresión.

2.6. Conclusión del estado del arte

El análisis del estado del arte muestra que el caucho reciclado puede aportar beneficios ambientales y modificar el comportamiento mecánico del concreto, aunque sus efectos dependen de la dosificación, granulometría, tratamiento superficial y condiciones de fabricación. Por ello, el presente estudio adopta una interpretación conservadora y limita sus conclusiones a la comparación descriptiva de la resistencia a la compresión disponible.

3. Metodología

3.1 Diseño de la investigación

Para abordar el objetivo del estudio se empleó un diseño experimental comparativo entre un concreto patrón (0% de caucho) y una mezcla identificada en los registros disponibles con la sustitución del 5% de la masa de la muestra por caucho reciclado como sustitución parcial del agregado fino. La variable de respuesta verificable fue la resistencia a la compresión a 7, 14 y 28 días.

El diseño se consideró experimental comparativo, debido a que se contrastaron dos condiciones de mezcla: patrón y 5% de caucho reciclado. No se realizó inferencia estadística, porque los registros conservados no permiten reconstruir el número de réplicas ni medidas de dispersión; en consecuencia, el análisis presentado es descriptivo.

El estudio busca determinar si la mezcla con la sustitución de la masa de la muestra con el 5% de caucho mantiene una resistencia a la compresión comparable con la mezcla patrón dentro del conjunto de valores reportado, evitando atribuir al material propiedades que no fueron verificadas mediante ensayos trazables.

3.1. Alcance de la investigación

El alcance es comparativo y descriptivo. Se analizaron los valores de resistencia a la compresión reportados para dos mezclas (0% y 5% de caucho) a tres edades de curado. Los resultados permiten una evaluación preliminar del comportamiento a compresión, pero no constituyen por sí mismos una validación integral para uso como superficie de rodamiento.

Los resultados permiten identificar la tendencia de la resistencia a la compresión dentro del conjunto de datos disponible. La aptitud para pavimentos requiere complementar esta evidencia con ensayos de flexión, abrasión, durabilidad, permeabilidad o absorción, exposición a humedad y, en su caso, módulo de elasticidad determinado mediante un procedimiento trazable.

3.2. Población y muestra

La comparación se realizó entre concreto convencional sin caucho, utilizado como referencia (0%), y concreto con una incorporación nominal de 5% de la masa de la muestra con caucho reciclado, descrita en la documentación disponible como sustitución parcial del agregado fino. No se incluyen tratamientos al 10% ni comparaciones entre granulometrías fina y gruesa, porque no se localizaron resultados verificables que permitan sustentarlos. Los registros conservados tampoco incluyen una distribución granulométrica o un tamaño nominal verificable del caucho empleado; por ello, el tamaño de partícula no se utiliza como variable experimental y se reconoce como una limitación del estudio.

3.3. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Para el análisis experimental se consideró como variable de respuesta la resistencia a la compresión. Los valores reportados corresponden a especímenes cilíndricos de 150 mm × 300 mm ensayados a 7, 14 y 28 días conforme al procedimiento indicado en el manuscrito para ASTM C39/C39M.

- Pruebas de resistencia a la compresión: se utilizaron los resultados reportados para especímenes cilíndricos de 150 mm × 300 mm a 7, 14 y 28 días. La interpretación se limita a esta propiedad, sin extrapolar los datos a flexión, módulo de elasticidad, durabilidad, impacto o trabajabilidad.

- Granulometría de los agregados: se realizó el análisis granulométrico de los agregados minerales conforme a ASTM C136/C136M y AASHTO T 27-23. La Figura 1 presenta los límites y curvas reportados para el agregado fino y el agregado grueso. Esta figura no se utiliza para atribuir una granulometría específica al caucho reciclado.

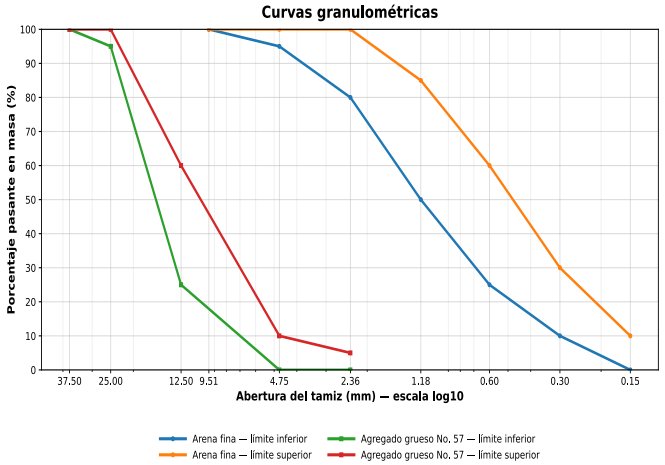


Figura 1: Curva granulométrica de agregados finos y gruesos. Fuente: Elaboración propia con datos del ensayo de granulometría; método conforme a ASTM C136/C136M (ASTM, 2018) y AASHTO T27-23 (AASHTO, 2024)

- Curado de las muestras: después del desmolde, los especímenes se mantuvieron en condiciones húmedas hasta las edades de ensayo. La documentación original refiere almacenamiento en agua potable durante el periodo de curado. La Figura 2 documenta visualmente los especímenes durante el periodo de curado.



Figura 2: Especímenes de concreto con caucho reciclado durante el periodo de curado. Fuente: fotografía de los autores, Laboratorio de Materiales UAEH.

3.4. Variables del estudio

- Variable independiente: condición de mezcla, con dos niveles analizados: concreto patrón (0% de caucho) y mezcla con incorporación nominal de 5% de caucho reciclado.

- El porcentaje de caucho se interpreta exclusivamente como la identificación de la mezcla consignada en los registros disponibles; no se incorporan al análisis proporciones adicionales sin resultados verificables. La Figura 3 muestra el caucho reciclado empleado en la campaña experimental.



Figura 3: Caucho reciclado utilizado en mezclas de concreto. Fuente: Fotografía tomada por los autores (2025). Este caucho proviene de la empresa Reciclados Renova Arandas S.A. de C.V.

- Variable dependiente: resistencia a la compresión del concreto a 7, 14 y 28 días, expresada en kgf/cm².

- Resistencia a la compresión: evaluada a los 7, 14 y 28 días de curado mediante el procedimiento indicado para ASTM C39/C39M.

3.6. Procedimiento experimental

3.6.1. Preparación de las mezclas

- Se empleó una mezcla patrón y una mezcla modificada con incorporación nominal de 5% de caucho reciclado. La dosificación base reportada para cemento Portland Ordinario con una resistencia de 30MPa, arena, grava y agua se presenta en la Tabla 1. Las dos condiciones de comparación se resumen en la Tabla 2.

- Las mezclas se elaboraron con agregados finos (arena) y gruesos (grava), siguiendo la granulometría establecida por las normas ASTM C33/C33M (ASTM, 2018).

Material	Cantidad y unidad
Cemento CPO 30R	10 kg
Arena	15 kg
Grava	13.5 kg
Agua	Relación a/c = 0.50

Tabla 1: Dosificación base reportada para la mezcla de concreto. Fuente: registros del estudio.

Condición	Descripción de la mezcla considerada
Patrón: 0% caucho	Concreto de referencia sin incorporación de caucho reciclado.
Modificada: Sustitución del 5% de la masa del agregado fino con caucho nominal	Sustitución parcial del agregado fino, según los registros disponibles.

Tabla 2: Condiciones de mezcla incluidas en la comparación. Fuente: registros disponibles del estudio.

Nota: *el 5% de caucho se conserva como identificación nominal de la mezcla porque no se recuperó la bitácora que permita reconstruir la base exacta de sustitución por masa o volumen.*

3.6.2. Incorporación de caucho reciclado

- La documentación disponible identifica caucho reciclado triturado procedente de proveedores locales. El material se describe como caucho vulcanizado reciclado particulado; no se afirma certificación de cumplimiento normativo del proveedor.

- ASTM D5603 se utiliza únicamente como referencia de clasificación para caucho vulcanizado reciclado particulado; la información disponible no incluye un certificado de conformidad del material empleado.

- Para el presente análisis se considera únicamente la mezcla identificada con 5% de caucho en kg, porque es la única condición modificada para la que se localizaron valores de resistencia a la compresión comparables con el patrón. La Figura 4 presenta el material identificado comercialmente como “Tuza Flex RR+30”; esta identificación no se utiliza para inferir un tamaño de partícula no documentado.



Figura 4: Caucho reciclado "Tuza Flex RR+30" utilizado en la mezcla de concreto. Fuente: Fotografía tomada por los autores (2025)

3.6.3. Elaboración y curado de especímenes

- Los especímenes se moldearon en cilindros de 150 mm × 300 mm. La documentación original reporta colocación de la mezcla en tres capas y compactación con varilla de punta semiesférica.

- Después del desmolde, los especímenes se mantuvieron en curado húmedo hasta las edades de ensayo. Se conserva esta descripción como condición reportada del procedimiento, sin extenderla a ensayos de durabilidad no documentados. La Figura 5 documenta el vertido y la compactación de la mezcla en los moldes.

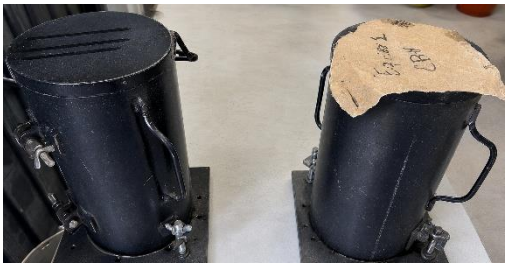


Figura 5: Vertido y compactación de la mezcla en moldes para especímenes.
Fuente: fotografía de los autores (2025).

3.6.4. Pruebas de laboratorio

- A los 7, 14 y 28 días se consideraron los valores reportados de resistencia a la compresión para la mezcla patrón y la mezcla con 5% de caucho. No se incluyen resultados de módulo de rotura, congelamiento-deshielo o módulo de elasticidad debido a que no se localizaron registros de ensayo suficientes para verificar su procedimiento y cálculo.

- Las pruebas de compresión se reportaron como realizadas en el Laboratorio de Materiales de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo mediante máquina de compresión, siguiendo el procedimiento indicado en el manuscrito para ASTM C39/C39M.

3.7. Justificación de la metodología

La metodología revisada prioriza la trazabilidad de la evidencia disponible. Por ello, el análisis se centra en la resistencia a la compresión como propiedad mecánica de comparación entre la mezcla patrón y la mezcla con 5% de caucho, y la literatura se emplea para contextualizar los resultados, no para sustituir resultados experimentales propios.

La comparación se presenta de forma descriptiva. No se reportan pruebas de significancia, desviaciones estándar ni intervalos de confianza porque los registros conservados no permiten reconstruir el número de réplicas ni la dispersión de los datos.

3.8. Estrategias de muestreo

El muestreo utilizado fue de conveniencia, basado en la disponibilidad de los agregados y del caucho reciclado proporcionados por las empresas locales.

La selección del caucho estuvo condicionada por la disponibilidad local. ASTM D5603 se cita como referencia de clasificación del caucho reciclado particulado y no como evidencia de certificación del lote utilizado.

3.9. *Fiabilidad* y validez de los instrumentos

El instrumento principal para la variable analizada fue la máquina de compresión del laboratorio. La revisión del manuscrito se restringe a los datos de compresión cuya magnitud y edad de ensayo pueden identificarse en los registros disponibles.

La comparabilidad del ensayo de compresión se apoya en el procedimiento indicado para ASTM C39/C39M. No se atribuye validez normativa a resultados de propiedades para las cuales no se dispone de un registro de ensayo verificable.

4. Resultados

4.1. Resistencia a la compresión

La resistencia a la compresión se comparó de manera descriptiva entre el concreto patrón y la mezcla con 5% de caucho a 7, 14 y 28 días. Los valores reportados fueron 159, 238 y 266 kgf/cm² para el patrón, y 165, 244 y 271 kgf/cm² para la mezcla con caucho.

Las diferencias entre ambas mezclas disminuyeron con la edad: a 7 días la mezcla con caucho fue 3.77% superior al patrón; a 14 días, 2.52%; y a 28 días, 1.88%. Estas diferencias se interpretan únicamente como variaciones descriptivas del conjunto de datos disponible.

En la Figura 6 se observa que, en las tres edades reportadas, la mezcla con 5% de caucho presentó valores de resistencia a la compresión ligeramente superiores a los de la mezcla patrón. A 28 días se registraron 271 kgf/cm² con caucho y 266 kgf/cm² en el patrón, equivalente a una diferencia de +1.88%. En consecuencia, se elimina la afirmación previa de una reducción de 8%, pues no corresponde a los valores mostrados en la gráfica.

De manera complementaria, Pelisser et al. (2011) estudiaron el efecto de la activación alcalina y de la incorporación de humo de sílice en concreto con caucho reciclado. Estos antecedentes muestran que el tratamiento del caucho puede modificar la respuesta del material, pero sus resultados no se emplean como sustituto de datos experimentales del presente estudio.

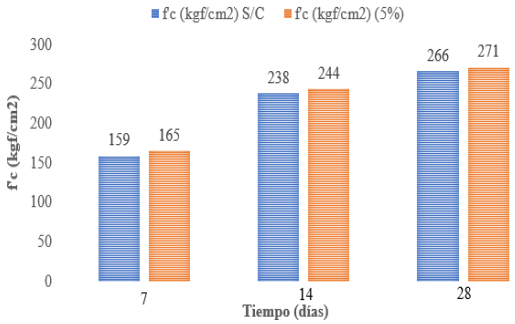


Figura 6: Resistencia a la compresión f'c del concreto patrón (0%) y de la mezcla con 5% de masa nominal de caucho reciclado.
Fuente: elaboración propia a partir de los valores reportados del ensayo de resistencia a la compresión.

- Análisis descriptivo de la resistencia a la compresión: respecto del valor a 28 días, el concreto patrón alcanzó aproximadamente 59.77% a 7 días y 89.47% a 14 días; la mezcla con 5% de caucho alcanzó aproximadamente 60.89% y 90.04%, respectivamente.

- La comparación directa entre mezclas muestra incrementos descriptivos de 3.77%, 2.52% y 1.88% para la mezcla con 5% de caucho a 7, 14 y 28 días, respectivamente. Estos porcentajes se calculan a partir de los valores de la Figura 6 y no deben

interpretarse como diferencias estadísticamente significativas.

- A 28 días, la diferencia observada fue de 5 kgf/cm² (271 frente a 266 kgf/cm²), equivalente a +1.88% respecto del patrón. Por tanto, los datos disponibles no sustentan una reducción de resistencia asociada al 5% de masa nominal de caucho.

- El conjunto disponible sólo permite comparar 0% y 5% de caucho; por ello, no es posible establecer una tendencia con el aumento del porcentaje de caucho ni identificar una dosificación óptima.

4.2. Alcance de la interpretación

Los datos disponibles permiten afirmar únicamente que la mezcla identificada con 5% de caucho alcanzó resistencias a la compresión ligeramente superiores al patrón en las tres edades reportadas. Debido a la ausencia de información sobre réplicas y dispersión, no se afirma significancia estadística ni superioridad general del material.

No se formulan conclusiones sobre deformabilidad, ductilidad, disipación de energía, cargas dinámicas, trabajabilidad, módulo de elasticidad o durabilidad, porque esas propiedades no cuentan con resultados de ensayo verificables en la documentación disponible.

La literatura se utiliza como contexto para explicar que el efecto del caucho depende de múltiples variables; sin embargo, las conclusiones del estudio se mantienen dentro del alcance de los datos propios reportados.

5. Discusión

Los resultados muestran que la mezcla con 5% de masa nominal de caucho alcanzó valores de resistencia a la compresión próximos y ligeramente superiores a los del concreto patrón en las tres edades evaluadas. A 28 días la diferencia fue de +1.88%, valor pequeño que debe interpretarse con cautela al no disponer de información de dispersión o réplicas.

La comparación no demuestra que el caucho produzca una mejora general de las propiedades del concreto; indica únicamente que, para la mezcla reportada, la incorporación nominal de 5% no estuvo asociada con una pérdida de resistencia a la compresión dentro de los valores disponibles.

La literatura reporta que la respuesta del concreto con caucho depende de la dosificación, la granulometría, el tratamiento superficial y la interfaz pasta-caucho. Por esta razón, la pequeña diferencia observada en este estudio no debe extrapolarse a otras dosificaciones o condiciones de fabricación.

En este sentido, los resultados constituyen una evaluación preliminar de resistencia a la compresión. La aptitud como superficie de rodamiento requiere ensayos adicionales orientados a desempeño en servicio.

5.1. Análisis cuantitativo de la resistencia a la compresión

La comparación cuantitativa se realizó con los valores de resistencia a la compresión disponibles para 0% y 5% de caucho. Para cada edad, la diferencia relativa se calculó restando la resistencia del patrón a la resistencia de la mezcla con 5%, dividiendo el resultado entre la resistencia del patrón y multiplicando por 100.

Con los valores reportados se obtuvieron diferencias de +3.77% a 7 días, +2.52% a 14 días y +1.88% a 28 días. Al no contar con medidas de dispersión, estas diferencias no se califican como estadísticamente significativas.

La literatura sobre concreto con caucho reporta cambios en deformabilidad, absorción de energía y rigidez; no obstante, dichas propiedades no fueron incorporadas a las conclusiones del presente estudio porque no se dispone de resultados experimentales verificables para ellas.

La principal limitación para la reproducibilidad es la falta de la bitácora experimental completa y de los datos individuales de cada espécimen. Por ello, el manuscrito revisado evita afirmaciones de precisión, significancia o replicabilidad que no puedan demostrarse.

5.2. Interpretación de la variable analizada

La variable de comparación fue la condición de mezcla (0% y 5% de caucho) y la variable de respuesta fue la resistencia a la compresión.

- Resistencia a la compresión: el concreto con 5% de caucho presentó 271 kgf/cm² a 28 días frente a 266 kgf/cm² del patrón, es decir, +1.88%. La versión previa del manuscrito indicaba una disminución de 8%; esa afirmación se corrige por ser incompatible con los valores reportados.

5.3. Limitaciones del estudio

El estudio presenta limitaciones importantes que condicionan el alcance de sus conclusiones:

- Calidad del Caucho Reciclado: La heterogeneidad del caucho reciclado puede afectar la reproducibilidad de los resultados. La falta de estandarización en la obtención y el procesamiento del caucho es un factor limitante que podría comprometer la uniformidad de las mezclas (Albano et al., 2005).

- Trazabilidad y cantidad de especímenes: no se dispone de la bitácora original completa, del número de réplicas ni de los datos individuales de cada espécimen. En consecuencia, no se reportan desviaciones estándar ni pruebas de significancia y los resultados se interpretan descriptivamente. Tampoco se dispone de caracterización granulométrica trazable del caucho ni de micrografías/cortes transversales que permitan cuantificar distribución de partículas, porosidad o cavidades internas.

- Condiciones ambientales y humedad: no se evaluaron de forma verificable exposición a humedad, permeabilidad, abrasión, ataque químico ni ciclos ambientales; por ello, no puede inferirse durabilidad en servicio a partir de la resistencia a la compresión.

5.4. Reflexión sobre el estado del arte y las fuentes de sesgo.

La comparación obtenida se discute frente a investigaciones previas sobre concreto con caucho. La literatura reporta respuestas variables en resistencia a la compresión y otras propiedades, en función del contenido de caucho, su granulometría, tratamiento y condiciones de fabricación (Pelisser et al., 2011; Liu et al., 2024).

Sin embargo, algunos estudios reportaron resultados inconsistentes en cuanto a la resistencia a la compresión al aumentar la proporción de caucho (Wu et al., 2025).

Una fuente potencial de sesgo es la trazabilidad incompleta de la campaña experimental original, además de la variabilidad propia del caucho reciclado. Esta limitación impide reconstruir con certeza la dispersión de los resultados y restringe la generalización de las conclusiones.

Un punto crítico para su aplicabilidad en pavimentos es la respuesta del material a la humedad. En tecnologías con caucho se ha documentado que el daño inducido por humedad puede acelerar la pérdida de integridad, especialmente cuando existe permeabilidad relevante y cargas repetidas; en asfalto, este mecanismo se asocia a pérdida de adhesión ligante–agregado (stripping) y degradación progresiva bajo lluvia y tránsito (Malluru et al., 2025; Osman et al., 2024)).

En materiales cementicios con caucho, la literatura coincide en que el caucho sin tratamiento tiende a generar una interfase menos adherente y más porosa, lo cual puede aumentar la entrada de agua y afectar la durabilidad; por ello, tratamientos como remojo controlado, activación alcalina (NaOH), recubrimiento cementicio o agentes de acoplamiento/silanos se reportan como estrategias para mejorar la ITZ y, con ello, el desempeño asociado a durabilidad (Roychand, 2021; Shahzad & Zhao, 2022; Jiang, 2021; Keleş et al., 2024).

Bajo esta óptica, la interpretación de los resultados del presente estudio debe ir acompañada de consideraciones sobre el control de la permeabilidad, la calidad de la interfase y las condiciones de servicio (lluvia, drenaje superficial/subsuperficial y tránsito), para evitar extrapolaciones de laboratorio a campo sin medidas de mitigación.

Los resultados no se utilizan para afirmar una mejora global del rendimiento. La evidencia disponible indica únicamente que la mezcla con 5% de caucho alcanzó una resistencia a la compresión a 28 días 1.88% mayor que el patrón, diferencia que se reporta de manera descriptiva y sin atribuir significancia estadística.

El aprovechamiento de caucho reciclado mantiene interés desde la perspectiva de economía circular; sin embargo, su adopción en superficies de rodamiento debe sustentarse en un programa experimental más amplio que incluya propiedades mecánicas y de durabilidad específicas.

6. Conclusiones

El estudio comparó los valores reportados de resistencia a la compresión de un concreto patrón y de una mezcla con incorporación de masa nominal de 5% de caucho reciclado, considerando su posible aplicación futura en superficies de rodamiento.

A partir de la revisión de la trazabilidad experimental, las conclusiones se limitaron a la resistencia a la compresión y se eliminaron afirmaciones relacionadas con propiedades para las que no se localizaron resultados verificables.

Los principales hallazgos se interpretan de forma descriptiva y deben considerarse junto con las limitaciones metodológicas señaladas.

6.1. Resumen de resultados y principales aportes

- Resistencia a la compresión: a 7, 14 y 28 días, la mezcla con 5% de caucho registró 165, 244 y 271 kgf/cm², mientras que el patrón registró 159, 238 y 266 kgf/cm². Las diferencias relativas fueron +3.77%, +2.52% y +1.88%, respectivamente.

- El resultado a 28 días no sustenta la reducción de 8% indicada en la versión anterior. Tampoco permite afirmar una mejora estadísticamente significativa, debido a que no se dispone de información suficiente sobre réplicas y variabilidad

- **Sostenibilidad y reciclaje**: La incorporación de caucho reciclado aporta ventajas significativas en materia de sostenibilidad. El uso de neumáticos reciclados en la producción de concreto contribuye a reducir los residuos sólidos, fomenta la economía circular y disminuye el impacto ambiental asociado al manejo de neumáticos fuera de uso.

- Este aporte refuerza el potencial del concreto con caucho reciclado como material sostenible y promotor de prácticas más responsables en la industria de la construcción.

6.2. Originalidad del trabajo

El aporte del trabajo radica en documentar la respuesta a compresión de una mezcla con incorporación nominal de 5% de caucho reciclado y, tras la revisión, delimitar sus conclusiones a la evidencia experimental que puede verificarse.

La investigación se concentra en una baja incorporación de caucho, pero no establece una dosificación óptima ni comparaciones con porcentajes mayores, porque no se dispone de resultados verificables para esas condiciones.

6.3. Limitaciones del estudio

Las principales limitaciones son: trazabilidad incompleta de la campaña experimental, ausencia de datos individuales y medidas de dispersión, análisis limitado a 0% y 5% de caucho, y falta de resultados verificables de trabajabilidad, flexión, módulo de elasticidad y durabilidad.

- Heterogeneidad del material: La calidad y homogeneidad del caucho reciclado utilizado pudieron haber influido en la variabilidad de los resultados, lo que limitó la capacidad de generalizar las conclusiones a otras fuentes de caucho reciclado. Las variaciones en la granulometría y la composición del caucho requieren un mayor control y estandarización en investigaciones futuras.

- Alcance temporal y de propiedades: la comparación se limita a edades de hasta 28 días y a resistencia a la compresión. No permite caracterizar el comportamiento a largo plazo ni el desempeño funcional de una superficie de rodamiento.

- Humedad y durabilidad: no se cuenta con resultados verificables de exposición a humedad, sales, abrasión, permeabilidad ni ciclos de congelamiento-deshielo. Estas evaluaciones son necesarias antes de proponer una aplicación en pavimentos.

A partir de los resultados y limitaciones identificadas, se proponen varias líneas de investigación futura:

- Evaluación experimental ampliada: repetir el programa con réplicas documentadas y análisis estadístico, incorporando resistencia a flexión, abrasión superficial, absorción/permeabilidad y exposición a humedad; si se evalúa módulo de elasticidad, debe utilizarse un procedimiento específico y trazable para esa propiedad.

- Optimización de dosificación: comparar de manera planificada varias proporciones de caucho, documentando con precisión si la sustitución se realiza por masa o volumen, la granulometría, la procedencia y cualquier tratamiento superficial aplicado.

- Estudios sobre el costo-beneficio: Evaluar el costo-beneficio de la implementación del caucho reciclado a escala comercial, considerando tanto el costo de adquisición y procesamiento del caucho como los beneficios en términos de reducción de desechos y mejora de ciertas propiedades del concreto.

- Esta evaluación busca servir de guía para determinar si esta técnica resulta económicamente viable para su adopción a gran escala en la industria de la construcción.

7. Declaración sobre el uso de Inteligencia Artificial generativa y tecnologías asistidas por IA

Durante la preparación del presente manuscrito, los autores utilizaron ChatGPT para corrección gramatical, optimizar la redacción, traducción y formulación lingüística. Todo el contenido generado o sugerido por la herramienta fue revisado y editado por los autores, quienes asumen plena responsabilidad por la exactitud, originalidad, integridad y rigor científico del contenido final del manuscrito.

8. Referencias

Agrawal, D., Amin, M. N., Ahmad, J., Alabduljabbar, H., Khan, K. A., Mosavi, A., & Aslam, F. (2023). Experimental effect of pre-treatment of rubber fibers on the performance of concrete. *Journal of Materials Research and Technology, 23, 791-807* https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.01.027

Ahmad, J. (2022). Overview of concrete performance made with waste rubber tires: A step toward sustainable concrete. *Materials, 15*(16), 5662. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9410276/

Albano, C., Camacho, N., Reyes, J., Feliu, J. L., & Hernández, M. (2005). Influence of scrap rubber addition to Portland concrete composites: Destructive and non-destructive testing. *Composite Structures, 71*, 439–446. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2005.09.037

American Association of State Highway and Transportation Officials. (2024). *AASHTO T 27-23: Sieve analysis of fine and coarse aggregates*. AASHTO.

Assaggaf, R. A., Ali, M. R., Al-Dulaijan, S. U., & Maslehuddin, M. (2021). Properties of concrete with untreated and treated crumb rubber – A review. *Journal of Materials Research and Technology, 11*, 1734–1755. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.02.019

ASTM. (2018a). *ASTM C39: Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens*. American Society for Testing and Materials.

ASTM. (2018b). *ASTM C136/C136M: Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates*. American Society for Testing and Materials.

ASTM International. (2019). ASTM D5603-19: Standard Classification for Rubber Compounding Materials—Recycled Vulcanizate Particulate Rubber. ASTM International.

El-Zohairy, A., Sanchez, M., Abediniangerabi, B., & Moler, P. (2023). Performance of rubberized concrete and the effect of temperature and stainless-steel fibers. *Buildings, 13*(2), 280. https://doi.org/10.3390/buildings13020280

Fadiel, A. A. M., Mohammed, N. S., Abu-Lebdeh, T., Munteanu, I. S., Niculae, E., & Petrescu, F. I. T. (2023). A comprehensive evaluation of the mechanical properties of rubberized concrete. *Journal of Composites Science, 7*(3), 129. https://doi.org/10.3390/jcs7030129

Farfán, M., & Leonardo, E. (2018). Recycled rubber in the compressive strength and bending of modified concrete with plasticizing admixture. *Revista de la Construcción, 17*(3), 515–524. https://doi.org/10.4067/S0718-50732018000300241

Gandel, R., Jerabek, J., & Varak, J. (2024). The influence of the use of recycled rubber in concrete on its selected properties. *E3S Web of Conferences, 550*, 01041. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202455001041

Ganjian, E., Khorami, M., & Maghsoudi, A. A. (2009). Scrap-tire-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

Guo, S., Dai, Q., Si, R., Sun, X., & Lu, C. (2017). Evaluation of properties and performance of rubber-modified concrete for recycling of waste scrap tire. *Journal of Cleaner Production, 148*, 681–689. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.046

Gupta, T., & Kua, H. W. (2017). Sustainability assessment of concrete and its ingredients: A comprehensive review. *Journal of Cleaner Production, 165*, 897–910.

Gupta, T., Kua, H. W., & Koh, H. B. (2018). Application of tire waste in concrete: A systematic review. *Construction and Building Materials, 168*, 77–91.

He, S., Jiang, Z., Chen, H., Chen, Z., Ding, J., Deng, H., & Mosallam, A. S. (2023). Mechanical properties, durability, and structural applications of rubber concrete: A state-of-the-art-review. Sustainability, 15(11), 8541. https://doi.org/10.3390/su15118541

Helmy, S. H., Tahwia, A. M., Mahdy, M. G., Elrahman, M. A., Abed, M. A., & Youssf, O. (2023). The use of recycled tire rubber, crushed glass, and crushed clay brick in lightweight concrete production: A review. *Sustainability, 15*(13), 10060. https://doi.org/10.3390/su151310060

Jiang, Z. (2021). Surface treatment of rubberized waste reinforced concrete. *Frontiers in Built Environment, 7*, 685067. https://doi.org/10.3389/fbuil.2021.685067

Keleş, Ö. F., Bayrak, O. Ü., & Bayata, H. F. (2024). Experimental investigation on the mechanical properties of sustainable roller-compacted concrete pavement (RCCP) containing waste rubbers as alternative aggregates. *Construction and Building Materials, 424*, 135930. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135930

Kilani, A. J., Ikotun, B. D., & Abdulwahab, R. (2025). Effect of crumb rubber on concrete's and mortar's structural properties: A review. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering, 49*, 1037–1067. https://doi.org/10.1007/s40996-024-01647-8.

Liu, J., Li, J., Xu, Y., & Ma, S. (2024). Mechanical properties of cement concrete with waste rubber powder. *Applied Sciences, 14*(15), 6636. https://doi.org/10.3390/app14156636

Malluru, S., Islam, S. M. I., Saidi, A., Baditha, A. K., Chiu, G., & Mehta, Y. (2025). A state-of-the-practice review on the challenges of asphalt binder and a roadmap towards sustainable alternatives—A call to action. *Materials, 18*(10), 2312. https://doi.org/10.3390/ma18102312

Moolchandani, K., & Sharma, A. (2025). State-of-the-art review on the influence of crumb rubber on the strength, durability, and morphological

properties of concrete. *Science and Engineering of Composite Materials, 32*(1), 20250060. https://doi.org/10.1515/secm-2025-0060

Osman, A., Hassan, A., & Omar, S. (2024). Resistance of rubberized asphalt mixture to aging and moisture damage. *IIUM Engineering Journal, 25*(2), 155–168. https://doi.org/10.31436/iiumej.v25i2.3040

Peláez Arroyave, G. J., Velásquez Restrepo, S. M., & Giraldo Vásquez, D. H. (2017). Applications of recycled rubber: A literature review. Ciencia e Ingeniería Neogranadina, 27(2), 27–50. https://doi.org/10.18359/rcin.2143

Pelisser, F., Zavarise, N., Longo, T. A., & Bernardin, A. M. (2011). Concrete made with recycled tire rubber: Effect of alkaline activation and silica fume addition. *Journal of Cleaner Production, 19*(6–7), 757–763. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.11.014

Roychand, R. (2021). Practical rubber pre-treatment approach for concrete use—An experimental study. *Journal of Composites Science, 5*(6), 143. https://doi.org/10.3390/jcs5060143

Segre, N., & Joekes, I. (2000). Use of tire rubber particles as addition to cement paste. *Cement and Concrete Research, 30*(9), 1421–1425. https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00373-2

Shahzad, K., & Zhao, Z. (2022). Experimental study of NaOH pretreated crumb rubber as a substitute of fine aggregate in concrete. *Construction and Building Materials, 358*, 129448. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129448

Sherbini, A. S., & Abou El-Mal, H. S. S. (2025). Assessment of rubberized concrete as a promising green building material. *Journal of Umm Al-Qura University for Engineering and Architecture, 16*, 1417–1425. https://doi.org/10.1007/s43995-025-00176-3

Surehali, S., Singh, A., & Biligiri, K. P. (2023). A state-of-the-art review on recycling rubber in concrete: Sustainability aspects, specialty mixtures, and treatment methods. *Developments in the Built Environment, 14*, 100171. https://doi.org/10.1016/j.dibe.2023.100171

Thomas, B. S., Gupta, R. C., & Panicker, V. J. (2016). Recycling of waste tire rubber as aggregate in concrete: Durability-related performance. *Journal of Cleaner Production, 112*, part 1,504–513 https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.08.046

Wu, L., Li, R., Zhu, Z., Pan, T., Aydin, B. B., & Zhou, Y. (2025). Effects of elevated temperature on rubber concrete: Fracture properties and mechanism analysis. *Construction and Building Materials, 466*, Article 140263. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.140263

Zheng, X., Pramanik, A., Basak, A. K., Prakash, C., & Shankar, S. (2022). Material recovery and recycling of waste tyres—A review. Cleaner Materials, 5, 100115. https://doi.org/10.1016/j.clema.2022.100115