



Efecto de la incorporación de caucho reciclado (4%, 5% y 6%) sobre la resistencia a compresión del concreto

Cristian Fabián Torres González

Gerson David Flórez Hoyos

Luz Dary Jiménez Moreno

Universidad EAN

Facultad de Ingeniería

Ingeniería Industrial / Producción

Bogotá, Colombia

24/05/2026

Efecto de la incorporación de caucho reciclado (4%, 5% y 6%) sobre la resistencia a compresión del concreto

Cristian Fabián Torres González

Gerson David Flórez Hoyos

Luz Dary Jiménez Moreno

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de:

Ingeniero industrial

Ingeniero de producción

Director (a):

Diana Paola Figueroa Hernández

Universidad EAN

Facultad de Ingeniería

Ingeniería Industrial / Producción

Bogotá, Colombia

24/05/2026

Nota de aceptación:

Firma del jurado

Firma del jurado

Firma del director del trabajo de grado

Bogotá D.C, 02/06/2026

Resumen

La acumulación de neumáticos fuera de uso representa un desafío ambiental significativo a nivel global, generando contaminación en suelos y cuerpos de agua. Simultáneamente, la industria de la construcción demanda grandes volúmenes de agregados naturales, lo que contribuye a la degradación de los ecosistemas. Como alternativa sostenible, la sustitución parcial del agregado fino por caucho reciclado en mezclas de concreto promueve la economía circular y la valorización de residuos. Este estudio evalúa la viabilidad técnica de un concreto con resistencia de diseño de 4000 psi (27.6 MPa), incorporando caucho granulado en porcentajes de sustitución del 4%, 5% y 6% respecto al volumen de arena. La metodología experimental contempla la elaboración de probetas cilíndricas bajo normativas técnicas colombianas, las cuales son sometidas a ensayos de resistencia a la compresión a los 7 y 28 días de curado. Se procede al análisis de los resultados mediante análisis de varianza (ANOVA) y pruebas de Tukey, con el fin de determinar si las mezclas modificadas logran mantener al menos un 85% de la resistencia de la mezcla control, lo que nos demostraría su para aplicaciones no estructurales. Esperamos que la incorporación controlada de partículas de caucho nos de un adecuado balance entre el desempeño mecánico del material y los beneficios ambientales que se deriven de la reducción en el consumo de recursos naturales no renovables.

Palabras Clave: Concreto sostenible, caucho reciclado, resistencia a la compresión, agregado fino, economía circular.

Abstract

The accumulation of end-of-life tires represents a significant environmental challenge globally, generating pollution in soils and water bodies. Simultaneously, the construction industry demands large volumes of natural aggregates, contributing to the degradation of ecosystems. As a sustainable alternative, the partial substitution of fine aggregate with recycled rubber in concrete mixes promotes the circular economy and waste recovery. This study evaluates the technical feasibility of concrete with a design strength of 4000 psi (27.6 MPa), incorporating granulated rubber in substitution percentages of 4%, 5%, and 6% relative to the volume of sand. The experimental methodology includes the preparation of cylindrical specimens under Colombian technical standards, which are subjected to compressive strength tests at 7 and 28 days of curing. The analysis of the results, based on analysis of variance (ANOVA) and Tukey tests, seeks to determine if the modified mixtures manage to maintain at least 85% of the strength of the control mix, thus establishing their suitability for non-structural applications. It is expected that the controlled incorporation of rubber particles offers an adequate balance between the mechanical performance of the material and the environmental benefits derived from the reduction in the consumption of non-renewable natural resources.

Keywords: Sustainable concrete, recycled rubber, compressive strength, fine aggregate, circular economy.

Introducción

El crecimiento poblacional y la industrialización han incrementado exponencialmente la producción y el consumo de vehículos a nivel global. Esta dinámica ha derivado en la generación de aproximadamente 1.000 millones de neumáticos de desecho cada año (Hisbani et al., 2025). Se proyecta que para el año 2030 esta cifra ascienda a 1.200 millones, agravando una crisis ambiental significativa debido a la naturaleza no biodegradable de estos materiales (Eissa et al., 2024). La disposición inadecuada de los neumáticos fuera de uso en vertederos a cielo abierto o su incineración genera graves problemas ecológicos. Entre estos problemas se incluye la contaminación del suelo, la emisión de gases tóxicos y la proliferación de vectores de enfermedades (Surehali et al., 2023). En paralelo, la industria de la construcción enfrenta su propio desafío de sostenibilidad debido a la extracción desmedida de recursos naturales finitos. Particularmente, la arena de río alcanza un consumo global de 50.000 millones de toneladas anuales, provocando la degradación de ecosistemas acuáticos y costeros (Programme, 2022).

Esta doble problemática hace que la transición hacia una economía circular se plantee como una estrategia imperativa para desvincular el desarrollo económico del consumo de recursos vírgenes (Ellen MacArthur Foundation, 2015). En el contexto colombiano, el sector de la construcción ha comenzado a adoptar lineamientos de sostenibilidad para mitigar su huella ecológica. Se espera que para el año 2027 más del 80 % de los proyectos de construcción en el país cuenten con algún tipo de certificación sostenible (CCCS, 2024). Una de las alternativas más prometedoras en este ámbito es la incorporación de residuos sólidos en la matriz de materiales de construcción. Específicamente, el uso de caucho reciclado proveniente de neumáticos fuera de uso ha ganado atención en las últimas tres décadas como un aditivo viable para el concreto (Zarhri et al., 2022).

A pesar de los beneficios ambientales evidentes, la incorporación de partículas de caucho en el concreto plantea desafíos técnicos considerables. La naturaleza hidrofóbica del caucho y su baja rigidez en comparación con los agregados pétreos tradicionales tienden a generar una zona de transición interfacial débil con la pasta de cemento. Esta incompatibilidad microestructural se traduce siempre en una reducción de las propiedades mecánicas del material endurecido, especialmente de su resistencia a la compresión (Qureshi et al., 2024).. Por lo tanto, la viabilidad técnica de estas mezclas modificadas depende de encontrar un equilibrio óptimo entre el porcentaje de sustitución y el desempeño mecánico requerido para aplicaciones específicas. En este sentido,

la literatura sugiere que porcentajes de reemplazo volumétrico inferiores al 10 % permiten mantener propiedades mecánicas aceptables para usos no estructurales (Karunarathna et al., 2021).

Considerando lo anterior, el presente estudio tiene como objetivo general evaluar el efecto de la incorporación de caucho reciclado en porcentajes del 4 %, 5 % y 6 % como sustituto parcial del agregado fino sobre la resistencia a la compresión de una mezcla de concreto diseñada para 4000 psi (27.6 MPa). Para alcanzar este propósito, se plantean los siguientes objetivos específicos: primero, diseñar y fabricar especímenes cilíndricos de concreto de control y modificados siguiendo la normativa técnica colombiana NTC 1377 (ICONTEC, 2000); segundo, determinar la resistencia a la compresión de las mezclas a los 7 y 28 días de curado; y tercero, analizar estadísticamente las variaciones en el desempeño mecánico mediante un análisis de varianza (ANOVA) unifactorial y pruebas de comparación múltiple de Tukey.

La investigación se articula en torno a la siguiente pregunta central: ¿En qué medida la sustitución volumétrica del agregado fino por caucho reciclado granulado (4 %, 5 % y 6 %) afecta la resistencia a la compresión de un concreto diseñado para 21 MPa a los 28 días de curado? A partir de esta interrogante, se formula la hipótesis de que, al mantener los porcentajes de sustitución en niveles bajos (menores al 10 %), las mezclas modificadas lograrán conservar al menos el 85 % de la resistencia de la mezcla de control a los 28 días. Este nivel de conservación de resistencia cumpliría con los requerimientos técnicos mínimos para emplear el material de manera segura en elementos constructivos no estructurales, tales como andenes, bordillos o muros divisorios.

Marco teórico

Sostenibilidad y economía circular en la construcción

La industria de la construcción es uno de los sectores con mayor impacto ambiental a nivel global, debido a su alta demanda de recursos naturales y a la generación masiva de residuos. El consumo de materiales de contera, particularmente la arena, ha alcanzado niveles críticos. Se estima que anualmente se extraen alrededor de 50.000 millones de toneladas de arena y grava en el mundo (Programme, 2022). Esta extracción tan elevada genera graves consecuencias ecológicas como lo son la erosión costera, la alteración de los lechos de los ríos y la pérdida de biodiversidad acuática (Fernández de Monje et al., 2025). Ante este panorama, la transición hacia una economía circular se plantea como una necesidad urgente. Este modelo económico busca desacoplar el crecimiento industrial del consumo de recursos finitos, promoviendo la reducción de residuos y la reincorporación de materiales al ciclo productivo (Ellen MacArthur Foundation, 2015).

En Colombia, la adopción de prácticas de construcción sostenible ha mostrado un avance significativo en los últimos años. El sector edificador ha comenzado a integrar estrategias de eficiencia de recursos y gestión de residuos en sus procesos constructivos (CCCS, 2024). Sin embargo, los costos de construcción continúan siendo un factor limitante para la adopción masiva de tecnologías verdes. Durante el año 2023, el Índice de Costos de la Construcción de Edificaciones (ICOCED) registró variaciones anuales cercanas al 8 %, presionando a los constructores a buscar alternativas de materiales que sean tanto económicas como sostenibles (Camacol, 2023). En este contexto, la valorización de residuos sólidos, como los neumáticos fuera de uso, emerge como una solución sinérgica que aborda simultáneamente la escasez de agregados naturales y la problemática de disposición de desechos.

El caucho reciclado como agregado en el concreto

El concreto modificado con caucho, comúnmente denominado "*rubcrete*", es un material compuesto en el cual una fracción de los agregados naturales es reemplazada por partículas de caucho provenientes del reciclaje de neumáticos. Las partículas de caucho se clasifican generalmente según su tamaño y morfología. El caucho triturado o en escamas (*chipped rubber*) presenta tamaños superiores a los 10 mm y suele utilizarse como reemplazo del agregado grueso (Dhivya & Priyadharshini, 2022). Por otro lado, el caucho granulado (*crumb rubber*) tiene dimensiones que oscilan entre 0.1 mm y 10 mm, siendo el sustituto ideal para el agregado fino o

arena (Moolchandani & Sharma, 2025). Finalmente, el polvo de caucho (rubber powder) consiste en partículas micrométricas menores a 0.1 mm, empleadas frecuentemente como relleno o filler en la matriz cementante (Zhang et al., 2025).

La incorporación de caucho granulado como sustituto de la arena es la práctica más extendida en la investigación actual, ya que ofrece un balance adecuado entre la trabajabilidad de la mezcla fresca y el desempeño mecánico del material endurecido. La densidad del caucho es significativamente menor que la de los agregados pétreos, lo que resulta en la producción de un concreto más ligero (Abunassar & Alas, 2025). Esta reducción de peso propio es ventajosa para disminuir las cargas muertas en las estructuras, facilitando el transporte y la manipulación de elementos prefabricados. Además, la naturaleza elástica del caucho confiere al concreto propiedades únicas de absorción de energía. Esta característica mejora notablemente la tenacidad del material y su capacidad para disipar impactos (Ji et al., 2024).

Efectos sobre las propiedades mecánicas

A pesar de las ventajas mencionadas, la sustitución de agregados naturales por caucho conlleva una penalización inevitable en las propiedades mecánicas del concreto, siendo la resistencia a la compresión el parámetro más afectado. Esta disminución de resistencia se atribuye principalmente a dos factores microestructurales. En primer lugar, el caucho es un material hidrofóbico que repele el agua durante el proceso de mezclado, lo que dificulta la hidratación adecuada del cemento en la periferia de las partículas (He et al., 2021). En segundo lugar, la superficie lisa y no porosa del caucho impide el desarrollo de una adherencia mecánica fuerte con la pasta de cemento, generando una zona de transición interfacial (ITZ) débil y porosa (Saloni et al., 2021).

Bajo la acción de cargas de compresión, la diferencia de rigidez entre el caucho elástico y la matriz cementante rígida provoca concentraciones de esfuerzos alrededor de las partículas de caucho. Estas concentraciones actúan como iniciadores de microfisuras que se propagan rápidamente a través de la ITZ débil, conduciendo a una falla prematura del espécimen (Alizadeh et al., 2024). La magnitud de la pérdida de resistencia es directamente proporcional al porcentaje de sustitución volumétrica. Investigaciones recientes indican que reemplazos superiores al 10 % pueden resultar en caídas de resistencia a la compresión de hasta un 40 % respecto a la mezcla de control (Agrawal et al., 2023). Por este motivo, para aplicaciones que requieren mantener un nivel

de resistencia estructural y semi estructural de 4000 psi (27.6 MPa), se recomienda limitar la sustitución de caucho a rangos bajos, típicamente entre el 4 % y el 6 % (Han et al., 2024).

Durabilidad y aplicaciones potenciales

Aunque la resistencia mecánica disminuye, la incorporación de caucho puede mejorar significativamente ciertos aspectos de la durabilidad del concreto. La elasticidad de las partículas de caucho actúa como un mecanismo de alivio de tensiones internas, reduciendo la formación de fisuras por contracción plástica y por secado (Liu et al., 2023). Asimismo, el concreto con caucho ha demostrado una resistencia superior a los ciclos de hielo-deshielo. Las partículas de caucho funcionan de manera análoga a los agentes inclusores de aire, proporcionando espacios vacíos que acomodan la expansión del agua al congelarse dentro de los poros capilares (Dou et al., 2022). Esta propiedad es particularmente valiosa en regiones con climas fríos extremos, donde el deterioro por congelamiento es una de las principales causas de falla en las infraestructuras de concreto (Sun et al., 2023).

En términos de aplicaciones prácticas, el concreto modificado con bajos porcentajes de caucho es idóneo para elementos no estructurales que no están sometidos a cargas críticas. Ejemplos de estas aplicaciones incluyen andenes, bordillos, barreras de contención, muros divisorios y bases estabilizadas para pavimentos (Jatoi et al., 2025). La utilización de este material en obras de infraestructura urbana no solo cumple con los requerimientos técnicos de resistencia moderada, sino que también contribuye activamente a la mitigación del impacto ambiental. Al desviar los neumáticos de los vertederos y reducir la extracción de arena de río, el concreto con caucho se consolida como una alternativa tecnológica alineada con los principios del desarrollo sostenible (Merli et al., 2020).

Estado del arte (Metodología PRISMA)

Para la construcción del estado del arte se aplicó una metodología de revisión sistemática de literatura basada en los lineamientos PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses). La búsqueda se centró en artículos científicos experimentales publicados entre los años 2020 y 2026, indexados en Scopus. Los criterios de inclusión exigieron que los estudios evaluaran empíricamente las propiedades mecánicas o de durabilidad del concreto modificado con caucho reciclado. Se priorizaron aquellos trabajos que utilizaron caucho granulado (crumb rubber) como sustituto parcial del agregado fino. Se excluyeron investigaciones puramente teóricas, estudios centrados exclusivamente en asfalto y artículos que no reportaran porcentajes exactos de sustitución.

Tras el proceso de cribado, se seleccionaron cuatro investigaciones experimentales recientes que abordan diferentes variables críticas: pretratamiento químico, tamaño de partícula, durabilidad a largo plazo y aplicaciones de alta resistencia. El análisis comparativo de estos estudios permite identificar las brechas de conocimiento actuales y justificar el enfoque de este proyecto en dosis bajas (4-6 %) para un diseño de 4000 psi (27.6 MPa), tal como se detalla en la **Tabla 1**.

Tabla 1

Matriz comparativa de estudios experimentales recientes sobre concreto con caucho reciclado

Autor/Año	Título	Objetivo	Metodología	Variables	Hallazgos	Limitaciones	Relación con nuestro proyecto
Yasser et al. (2023)	Experimental investigation of durability properties of rubberized concrete	Evaluar las propiedades mecánicas y de durabilidad del concreto utilizando agregados de caucho local en Egipto.	Diseño de dos grupos de mezclas (M40 y M60) con sustitución volumétrica de arena por caucho. Ensayos de compresión, sorbilidad, penetración de cloruros y resistencia al fuego.	Sustitución de arena: 0 %, 10 %, 15 %, 20 %. Tamaño de caucho: mezcla de polvo (0-1 mm) y gránulos (1-4 mm).	La resistencia a compresión disminuyó gradualmente (hasta 33 % con 20 % de caucho). Sin embargo, la trabajabilidad mejoró y la densidad se redujo un 9 %.	Caída drástica de resistencia con sustituciones altas (20 %). Resultados de durabilidad variables según el diseño de mezcla.	Confirma que sustituciones bajas son necesarias para mantener la resistencia. Nuestro proyecto se limita a 4-6 % para evitar la caída severa reportada en este estudio.

Autor/Año	Título	Objetivo	Metodología	Variables	Hallazgos	Limitaciones	Relación con nuestro proyecto
Shahzad & Zhao (2022)	Experimental study of NaOH pretreated crumb rubber as substitute of fine aggregate in concrete	Investigar el efecto de la concentración de NaOH y el tiempo de pretratamiento del caucho sobre la resistencia del concreto.	Pretratamiento del caucho con NaOH (0.1, 0.5 y 1 M) por 2 y 24 horas. Elaboración de 261 cubos y 58 cilindros para ensayos a 7, 28 y 90 días.	Sustitución de arena: 2 %, 5 %, 10 %, 20 %. Concentración NaOH. Tiempo de inmersión.	El pretratamiento recuperó hasta un 19.8 % de la resistencia perdida en dosis altas (20 %). Sin embargo, en dosis bajas (2 %), el pretratamiento tuvo un efecto negativo.	El pretratamiento químico incrementa los costos, el tiempo de producción y los riesgos ambientales por el manejo de NaOH.	Justifica nuestra decisión de usar caucho sin pretratamiento, ya que en dosis bajas (4-6 %) el tratamiento químico puede ser contraproducente o innecesario.
Han et al. (2024)	Experimental study on freeze-thaw failure of concrete incorporating waste tire crumb rubber...	Evaluar la resistencia a ciclos rápidos de hielo-deshielo del concreto con caucho y proponer nuevas ecuaciones de evaluación.	Sometimiento de especímenes a ciclos rápidos de hielo-deshielo. Medición de pérdida de masa, módulo elástico dinámico y vida	Sustitución de arena: 1.0 % a 5.0 %. Caucho tratado vs. no tratado. Ciclos térmicos.	La vida útil aumentó con el contenido de caucho hasta un óptimo del 3.0 % (275 ciclos), pero disminuyó con porcentajes mayores.	Se enfoca en climas fríos extremos, condiciones que no aplican a todos los contextos geográficos (ej. Colombia).	Demuestra que el rango óptimo de caucho se encuentra en porcentajes bajos (cercaos al 3-5 %), respaldando nuestra elección

Autor/Año	Título	Objetivo	Metodología	Variables	Hallazgos	Limitaciones	Relación con nuestro proyecto
			útil de durabilidad.				de 4 %, 5 % y 6 %.
Kaewunruen & Meesit (2020)	Eco-friendly high-strength concrete engineered by micro crumb rubber... for railway components	Desarrollar concreto de alta resistencia con microcaucho para aplicaciones estructurales en componentes ferroviarios.	Uso de microcaucho y humo de sílice. Ensayos de compresión, tracción indirecta y flexión para alcanzar resistencias superiores a 55 MPa.	Tamaño de partícula: 425 y 75 micrómetros. Adición de humo de sílice.	Se logró superar los 55 MPa. La resistencia a la tracción y flexión aumentó respecto al concreto simple, mejorando la resistencia a la fisuración.	Requiere molienda criogénica o muy fina (microcaucho) y aditivos costosos (humo de sílice), limitando su viabilidad económica masiva.	Contrasta con nuestro enfoque: mientras ellos buscan alta resistencia con microcaucho costoso, nosotros buscamos viabilidad económica (4000 psi / 27.6 MPa) con caucho estándar (0.5-2 mm).

Como se evidencia en la revisión sistemática, la literatura reciente converge en que la sustitución de agregados naturales por caucho reciclado conlleva una disminución inevitable de la resistencia a la compresión. Esta pérdida de resistencia se agrava a medida que aumenta el porcentaje de reemplazo (Yasser et al., 2023). Para contrarrestar este efecto, algunos autores han explorado el pretratamiento químico (Shahzad & Zhao, 2022). Otros investigadores han optado por el uso de micropartículas combinadas con humo de sílice (Kaewunruen & Meesit, 2020). Sin embargo, estas soluciones incrementan significativamente los costos de producción y la complejidad técnica, alejándose de la viabilidad económica requerida para aplicaciones a gran escala. Por otro lado, estudios enfocados en durabilidad demuestran que los beneficios del caucho alcanzan su punto máximo en porcentajes de sustitución bajos, típicamente entre el 3 % y el 7 % (Han et al., 2024).

En consecuencia, el presente proyecto se desmarca de la búsqueda de concretos de alta resistencia o tratamientos químicos complejos. En su lugar, se enfoca en evaluar la viabilidad técnica de una mezcla estándar de 4000 psi (27.6 MPa) con caucho granulado sin tratar (0.5 a 2 mm) en proporciones del 4 %, 5 % y 6 %. Este enfoque busca maximizar el beneficio ambiental de la valorización del residuo, manteniendo un proceso de fabricación económicamente accesible y garantizando que la resistencia residual sea suficiente para elementos constructivos no estructurales.

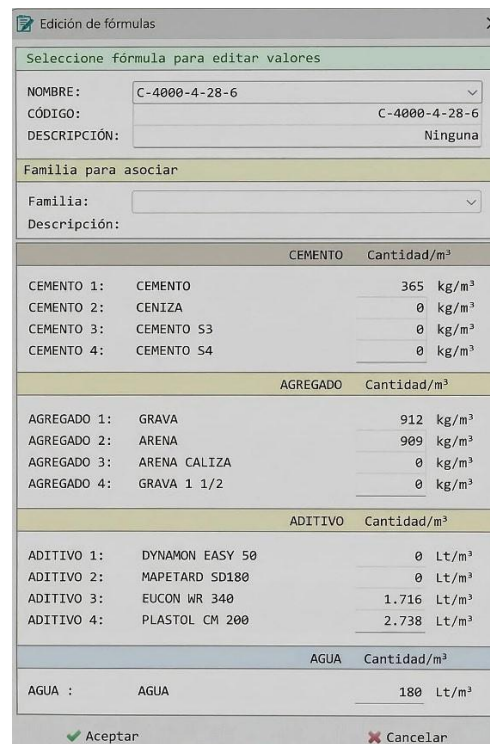
Metodología

Enfoque y diseño experimental

La presente investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo de tipo experimental, orientado a evaluar el efecto de la incorporación de caucho reciclado sobre la resistencia a la compresión del concreto. El diseño experimental consistió en la formulación de una mezcla de control diseñada para alcanzar una resistencia a la compresión de 4000 psi (27.6 MPa) a los 28 días de curado, y tres mezclas experimentales en las cuales se sustituyó parcialmente el agregado fino (arena) por caucho granulado. Los porcentajes de sustitución volumétrica evaluados fueron del 4 %, 5 % y 6 %. Para garantizar la representatividad estadística de los resultados, se elaboraron cuatro especímenes cilíndricos estándar (150 mm de diámetro por 300 mm de altura) por cada diseño de mezcla, resultando en un total de 16 probetas de ensayo.

Figura 1

Diseño de mezcla C-4000 (27.6 MPa) generado en software de laboratorio



Edición de fórmulas

Seleccione fórmula para editar valores

NOMBRE: C-4000-4-28-6
CÓDIGO: C-4000-4-28-6
DESCRIPCIÓN: Ninguna

Familia para asociar

Familia:
Descripción:

CEMENTO		Cantidad/m³
CEMENTO 1:	CEMENTO	365 kg/m³
CEMENTO 2:	CENIZA	0 kg/m³
CEMENTO 3:	CEMENTO S3	0 kg/m³
CEMENTO 4:	CEMENTO S4	0 kg/m³

AGREGADO		Cantidad/m³
AGREGADO 1:	GRAVA	912 kg/m³
AGREGADO 2:	ARENA	909 kg/m³
AGREGADO 3:	ARENA CALIZA	0 kg/m³
AGREGADO 4:	GRAVA 1 1/2	0 kg/m³

ADITIVO		Cantidad/m³
ADITIVO 1:	DYNAMON EASY 50	0 Lt/m³
ADITIVO 2:	MAPETARD SD180	0 Lt/m³
ADITIVO 3:	EUCON WR 340	1.716 Lt/m³
ADITIVO 4:	PLASTOL CM 200	2.738 Lt/m³

AGUA		Cantidad/m³
AGUA :	AGUA	180 Lt/m³

✓ Aceptar ✗ Cancelar

Materiales y dosificación

Los materiales empleados incluyeron cemento Portland de uso general, agua potable, aditivo retardante de fraguado y aditivo plastificante reductor de agua. Como agregados pétreos se utilizó grava de calibre 3/4" de origen fracturado y arena de río. El caucho reciclado provino de la trituración mecánica de neumáticos fuera de uso, con granulometría entre 0.5 y 2.0 mm, sin pretratamiento químico. Las dosificaciones se calcularon para un volumen de 0.04 m³ por mezcla, siguiendo el diseño de laboratorio C-4000-4-28-6 (27.6 MPa).

Para garantizar la precisión en la dosificación y el control de la relación agua/cemento, se determinaron las propiedades físicas de los agregados al momento de la mezcla: la grava presentó una humedad del 1.0% y una absorción del 1.5%, mientras que la arena registró una humedad del 2.0% y una absorción del 0.8%. Estos valores fueron fundamentales para realizar los ajustes técnicos por humedad en el pesado de los materiales, asegurando que el agua efectiva correspondiera estrictamente al diseño original. Para la ejecución, los porcentajes de sustitución volumétrica del caucho se convirtieron a masa (kg) considerando las densidades de los materiales, asegurando la precisión en el pesaje de todos los componentes.

Figura 2

Caucho granulado reciclado proveniente de neumáticos fuera de uso, previo a su incorporación en las mezclas



Figura 3

Granulometría del caucho reciclado molido (0.5–2.0 mm) utilizado como sustituto parcial del agregado fino

**Figura 4**

Áridos dosificados en sitio: arena de río, grava de ¾" y cemento portland, previo al mezclado



Diseño de Mezcla

El diseño de la mezcla de concreto utilizado en esta investigación, identificado bajo el código C-4000-4-28-6, no fue generado mediante software, sino que fue proporcionado directamente por un laboratorio especializado encargado de la dosificación. Esta nomenclatura técnica se interpreta de la siguiente manera: C indica un concreto diseñado para esfuerzos de compresión; 4000 representa la resistencia esperada de 4000 psi (27.6 MPa); 4 corresponde al uso de agregado grueso de 3/4 de pulgada; 28 señala el tiempo de curado estándar para alcanzar la resistencia; y 6 representa el asentamiento (slump) esperado de 6 pulgadas, verificado mediante el ensayo de asentamiento para garantizar la manejabilidad de la mezcla fresca.

Tabla 2

Dosificación de materiales para 0.04 m³ de mezcla de concreto

Material	Control (0%)	Exp. 1 (4%)	Exp. 2 (5%)	Exp. 3 (6%)
Cemento (kg)	14.60	14.60	14.60	14.60
Arena (kg)	28.80	27.65	27.36	27.07
Grava (kg)	37.60	37.60	37.60	37.60
Caucho (kg)	0.00	0.69	0.86	1.03
Agua (L)	7.30	7.30	7.30	7.30
Aditivo retardante (L)	0.0686	0.0686	0.0686	0.0686
Aditivo plastificante (L)	0.1095	0.1095	0.1095	0.1095

Nota: Los valores de caucho en masa (kg) corresponden a la sustitución volumétrica del 4 %, 5 % y 6 % de la arena, calculados a partir de la densidad aparente del caucho granulado. Se mantuvo constante la relación agua/cemento y la cantidad de agregados gruesos en todas las mezclas para aislar el efecto del caucho sobre la resistencia.

Elaboración y curado de especímenes

El proceso de mezclado se llevó a cabo en una mezcladora eléctrica portátil de laboratorio. Los materiales secos (cemento, arena, grava y caucho) se incorporaron primero en la mezcladora, seguidos del agua y los aditivos plastificante y retardante, garantizando la distribución homogénea

de los materiales. El llenado de los moldes cilíndricos y la compactación en tres capas mediante varillado manual se realizaron siguiendo los estándares internacionales para la preparación de especímenes de concreto (ASTM International, 2024).

Antes del vaciado, se ejecutó la prueba de asentamiento (*slump test*) para verificar la consistencia de la mezcla fresca. Se confirmó que la manejabilidad de las mezclas se mantuvo dentro de los parámetros esperados por el diseño de laboratorio, cumpliendo con un asentamiento de 6 pulgadas, lo cual facilitó la colocación y compactación de los especímenes a pesar de la incorporación de las partículas de caucho. Transcurridas 24 horas, los especímenes se desmoldaron, identificaron y sumergieron en tanque de curado con agua hasta el momento de los ensayos.

Figura 5

Balanza de precisión OHAUS Ranger 3000 utilizada para el pesaje de los materiales



Figura 6

Mezcladora eléctrica portátil empleada para la preparación de las cuatro mezclas de concreto



Figura 7

Pesaje del cemento portland (14.60 kg) conforme a la dosificación de diseño



Figura 8

Calculo de densidad aparente de caucho granulado



Figura 9

Pesaje del caucho reciclado granulado para la mezcla experimental.



Figura 10

Mezcla fresca de concreto con caucho reciclado en proceso de homogenización.



Figura 11

Prueba de asentamiento slump test



Figura 12

Especímenes recién vaciados en moldes



Figura 13

Especímenes cilíndricos recién desmoldados a las 24 horas, previo al curado



Figura 14

Especímenes cilíndricos sumergidos en piscina de curado hasta la edad de ensayo



Ensayos de resistencia a la compresión

Los ensayos se ejecutaron conforme a la NTC 673 (ICONTEC, 2010), equivalente a la ASTM C39 (ASTM International, 2021), a los 7 y 28 días de curado. Para cada edad y mezcla se ensayaron dos probetas réplica en prensa hidráulica digital calibrada, aplicando carga axial continua hasta la falla.

Para evaluar la significancia de las variaciones en la resistencia a la compresión, los datos obtenidos a los 28 días se sometieron a un análisis de varianza (ANOVA) unifactorial. Posteriormente, se aplicó la prueba de comparación múltiple de Tukey con un nivel de significancia del 5% ($\alpha = 0.05$) para identificar diferencias significativas entre la mezcla de control y las mezclas con caucho reciclado.

Resultados

En cuanto a las propiedades en estado fresco, se observó que la incorporación de caucho reciclado no comprometió la trabajabilidad de la mezcla. Todas las muestras mantuvieron el asentamiento de 6 pulgadas definido en el diseño de laboratorio (C-4000-4-28-6), lo que permitió una compactación uniforme y evitó la formación de vacíos macroscópicos en los especímenes endurecidos, garantizando así la fiabilidad de los ensayos de compresión posteriores.

Los resultados de los ensayos de resistencia a la compresión, ejecutados a los 7 y 28 días de curado, evidencian el impacto directo de la sustitución volumétrica del agregado fino por caucho reciclado. La mezcla de control (0 % de caucho) alcanzó una resistencia promedio de 39.58 MPa a los 28 días, superando ampliamente la resistencia de diseño de 4000 psi (27.6 MPa). Todas las mezclas modificadas experimentaron una reducción proporcional al porcentaje de sustitución.

Tabla 3
Resultados de resistencia a la compresión a los 7 y 28 días

Mezcla	Esp. 1 (7d)	Esp. 2 (7d)	Prom. (7d)	Esp. 3 (28d)	Esp. 4 (28d)	Prom. (28d)
Control (0 %)	38.41 MPa	37.52 MPa	37.97 MPa	40.12 MPa	39.05 MPa	39.58 MPa
Exp. 1 (4 %)	24.06 MPa	24.15 MPa	24.10 MPa	30.31 MPa	31.46 MPa	30.88 MPa
Exp. 2 (5 %)	22.25 MPa	23.15 MPa	22.70 MPa	23.42 MPa	23.85 MPa	23.64 MPa
Exp. 3 (6 %)	20.63 MPa	19.78 MPa	20.20 MPa	22.41 MPa	22.57 MPa	22.49 MPa

Tabla 4
Resistencia a 28 días y porcentaje respecto a la mezcla de control

Mezcla	Resistencia 28d (MPa)	% respecto al control	¿Supera 4000 psi (27.6 MPa)
Control (0 %)	39.58	100.0 %	Sí
Exp. 1 (4 %)	30.88	78.0 %	Sí
Exp. 2 (5 %)	23.64	59.7 %	No
Exp. 3 (6 %)	22.49	56.8 %	No

El análisis de varianza (ANOVA) realizado a los 28 días arrojó un p-valor de 0.000024, lo que confirma que la incorporación de caucho tiene un efecto estadísticamente significativo sobre la resistencia. La prueba de Tukey (Tabla 5) permitió identificar que existen diferencias significativas entre el control y todas las mezclas experimentales.

Tabla 5

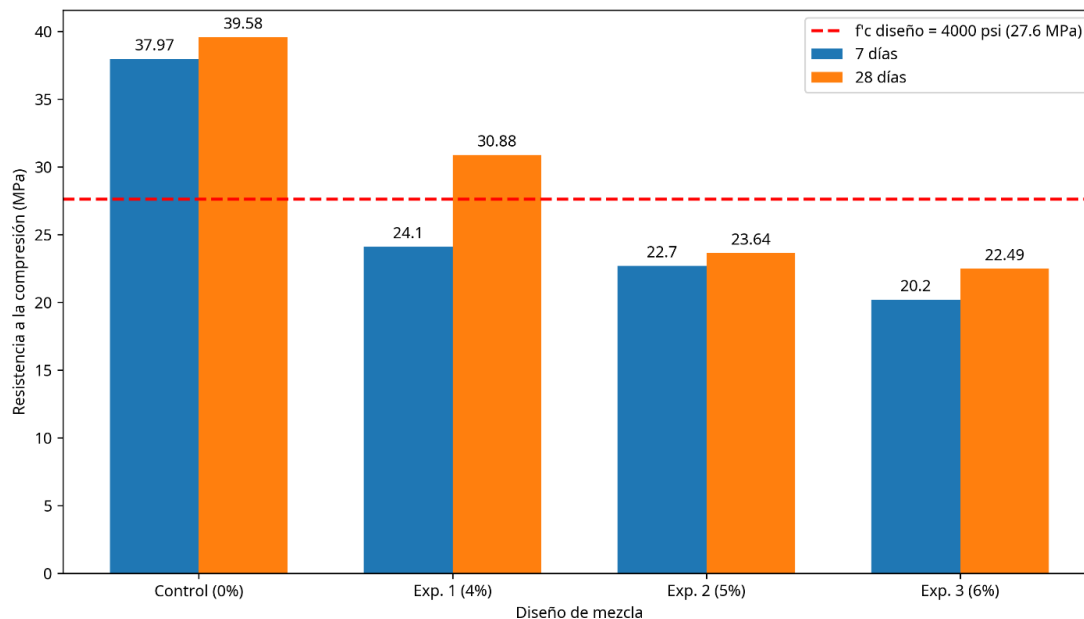
Prueba de comparación múltiple de Tukey (28 días)

Comparación	Diferencia (MPa)	p-valor	Significativo
Control vs 4%	8.70	0.0004	Sí
Control vs 5%	15.95	0.0000	Sí
Control vs 6%	17.10	0.0000	Sí
4% vs 5%	7.25	0.0008	Sí
5% vs 6%	1.15	0.3285	No

Ninguna mezcla alcanzó el umbral del 85 % de retención de resistencia respecto al control. Sin embargo, solo la mezcla con 4 % de caucho logró superar el umbral de diseño de 4000 psi (27.6 MPa), mientras que las mezclas del 5 % y 6 % se mantuvieron por debajo de este requerimiento estructural. lo que tiene implicaciones directas para la discusión sobre viabilidad técnica en aplicaciones no estructurales.

Gráfica 1

Resistencia a la compresión promedio a los 7 y 28 días para las cuatro mezclas evaluadas



Durante la ejecución de los ensayos a los 7 días de curado en la prensa hidráulica digital DPX, se documentó visualmente el comportamiento de los especímenes bajo carga axial progresiva. La mezcla de control presentó una falla frágil y explosiva, mientras que los especímenes con caucho mostraron un patrón de fisuras más distribuido y una mayor deformación previa a la falla, evidenciando el efecto de la elasticidad del caucho sobre la ductilidad del material.

Figura 15

Especimen cilíndrico posicionado en la prensa hidráulica DPX previo al ensayo a los 7 días



Figura 16

Especímenes cilíndricos fracturados tras el ensayo de compresión a los 7 días, evidenciando el patrón de falla tipo cono y corte



A los 28 días de curado, los ensayos confirmaron la tendencia observada a los 7 días. La mezcla de control alcanzó su resistencia máxima de 39.58 MPa, mientras que las mezclas experimentales mostraron resistencias de 30.88 MPa (4 %), 23.64 MPa (5 %) y 22.49 MPa (6 %), donde solo la mezcla del 4 % logró superar el umbral de diseño de 4000 psi (27.6 MPa). Los patrones de fractura a los 28 días también evidenciaron diferencias entre las mezclas, con los especímenes modificados mostrando fisuras diagonales características de falla por cortante, en contraste con la falla vertical por aplastamiento del concreto de control.

Figura 17

Espécimen fracturado en la prensa hidráulica durante el ensayo a los 28 días



Discusión

La disminución de la resistencia a la compresión observada en las mezclas modificadas con caucho reciclado es consistente con los mecanismos de falla reportados en la literatura especializada. La reducción del 22.0 % en la resistencia para la mezcla con 4 % de sustitución, y del 43.2 % para la mezcla con 6 %, se atribuye principalmente a la naturaleza hidrofóbica de las partículas de caucho. Esta característica repele el agua durante el proceso de mezclado, atrapando aire en la superficie del polímero y generando un engrosamiento de la zona de transición interfacial

(ITZ) entre el agregado y la pasta de cemento (Vasudevan et al., 2026). Además, la diferencia significativa entre el módulo de elasticidad del caucho y el de los agregados pétreos naturales provoca concentraciones de esfuerzos alrededor de las partículas elásticas cuando la matriz de concreto es sometida a cargas axiales, actuando como puntos débiles que inician la propagación de microfisuras (Mehta & Monteiro, 2014).

Al comparar estos resultados con investigaciones previas, se evidencia que el tamaño de la partícula de caucho juega un rol fundamental en la magnitud de la pérdida de resistencia. Karunarathna et al. (2021) demostraron que la sustitución de agregados finos por caucho granulado (2 a 4 mm) resulta significativamente menos perjudicial que la sustitución de agregados gruesos por fragmentos de mayor tamaño (15 mm). En el presente estudio, el uso de caucho granulado fino (0.5 a 2.0 mm) permitió que, incluso con una pérdida de resistencia superior al 40 % en la mezcla más crítica, el concreto mantuviera una capacidad de carga de 22.49 MPa, la cual, aunque supera los 21 MPa iniciales, se sitúa por debajo del umbral de diseño de 4000 psi (27.6 MPa). Este comportamiento contrasta con los hallazgos de estudios que emplearon caucho grueso, donde sustituciones similares provocaron caídas de resistencia por debajo de los límites estructurales aceptables (Neville, 2011).

A pesar de la penalización en la resistencia máxima, el patrón de fractura observado en los especímenes modificados sugiere una mejora sustancial en la ductilidad del material. A diferencia del concreto de control, que exhibió una falla frágil y explosiva típica de las mezclas de alta resistencia, los cilindros con caucho mantuvieron su integridad estructural post-falla. Este fenómeno de "puenteo de grietas" (crack bridging) ocurre porque las partículas elásticas de caucho son capaces de deformarse y absorber energía de deformación antes de romperse, retrasando el colapso catastrófico del espécimen (Karunarathna et al., 2021). Esta característica de alta absorción de energía resulta particularmente ventajosa para aplicaciones donde la resistencia al impacto y la tenacidad son prioritarias sobre la resistencia a la compresión pura, tales como barreras de contención, andenes o pavimentos rígidos de bajo tráfico.

Desde una perspectiva de sostenibilidad, los resultados validan la viabilidad técnica de incorporar hasta un 6 % de caucho reciclado en mezclas de concreto de 4000 psi (27.6 MPa) sin requerir pretratamientos químicos costosos ni adiciones de nanomateriales. Si bien investigaciones recientes han demostrado que la adición de nanotubos de carbono de pared múltiple (MWCNTs) puede mitigar casi por completo la pérdida de resistencia en el concreto con caucho (Vasudevan

et al., 2026), dichas soluciones incrementan exponencialmente el costo de producción, limitando su aplicabilidad a gran escala. El enfoque adoptado en este proyecto demuestra que una dosificación controlada de caucho crudo ofrece un equilibrio óptimo entre el desempeño mecánico requerido por la normativa (ASTM International, 2021) y el beneficio ambiental derivado de la valorización de neumáticos fuera de uso, contribuyendo efectivamente a la mitigación de la contaminación por microplásticos y la preservación de los agregados naturales (Rangel-Buitrago et al., 2026).

Análisis de resultados

Para validar la consistencia y confiabilidad de los datos experimentales, se realizó un análisis estadístico descriptivo de los resultados de resistencia a la compresión. La evaluación de la dispersión de los datos revela un alto grado de precisión en la elaboración y ensayo de los especímenes. Como se observa en la **Tabla 6** el coeficiente de variación (CV) para todas las mezclas a los 28 días se mantuvo por debajo del 3.0 %. Estos valores, significativamente inferiores al límite del 10 % comúnmente aceptado en ensayos de compresión de concreto, demuestran que el proceso de mezclado mecánico y la compactación fueron altamente homogéneos, minimizando la variabilidad inherente a la distribución de las partículas de caucho en la matriz cementante.

Tabla 6

Análisis estadístico de la resistencia a la compresión a los 28 días

Mezcla	Resistencia Promedio (MPa)	Desviación Estándar (MPa)	Coeficiente de Variación (CV)	Reducción respecto al control
Control (0 %)	39.58	0.76	1.91 %	-
Exp. 1 (4 %)	30.88	0.81	2.63 %	22.0 %
Exp. 2 (5 %)	23.64	0.30	1.29 %	40.3 %
Exp. 3 (6 %)	22.49	0.11	0.50 %	43.2 %

El análisis de la tasa de desarrollo de resistencia entre los 7 y los 28 días revela comportamientos divergentes entre las mezclas (**Tabla 3**). Mientras que la mezcla de control experimentó una ganancia de resistencia marginal del 4.3 % en este periodo, indicando un curado acelerado temprano, la mezcla con 4 % de caucho exhibió un incremento sustancial del 28.1 %. Este fenómeno sugiere que la presencia de partículas de caucho en proporciones moderadas podría estar alterando la cinética de hidratación del cemento, posiblemente debido a un efecto de curado interno facilitado por la textura superficial del caucho, el cual promueve una hidratación continua de la matriz cementante en dosis moderadas. Sin embargo, este efecto no se observó en las mezclas con 5 % y 6 % de sustitución, lo que indica que existe un umbral de saturación a partir del cual el exceso de polímero interrumpe la continuidad de la red de silicatos de calcio hidratados (C-S-H).

A partir de estos valores se calculó la pendiente del modelo, obteniendo la ecuación de regresión: $y = -3.05x + 39.58$, donde y representa la resistencia a la compresión (MPa) y x el porcentaje de sustitución de caucho (%). El coeficiente de determinación obtenido fue de $R^2 = 0.92$, lo que indica que el 92 % de la variabilidad en la resistencia a la compresión puede ser explicada por el porcentaje de incorporación de caucho reciclado. Esta fuerte correlación negativa confirma que, para el rango evaluado, cada incremento del 1 % en la sustitución de caucho genera una pérdida promedio de resistencia de aproximadamente 3.05 MPa.

Tabla 7
Evolución de la resistencia a la compresión entre los 7 y 28 días

Mezcla	Resistencia 7 días (MPa)	Resistencia 28 días (MPa)	Ganancia de resistencia (7 a 28 días)
Control (0 %)	37.97	39.58	4.3 %
Exp. 1 (4 %)	24.10	30.88	28.1 %
Exp. 2 (5 %)	22.70	23.64	4.1 %
Exp. 3 (6 %)	20.20	22.49	11.3 %

Adicionalmente, se evaluó la correlación entre el porcentaje de sustitución volumétrica de caucho y la resistencia final a la compresión a los 28 días mediante un modelo de regresión lineal simple. Para cuantificar esta relación, se aplicó el método de mínimos cuadrados ordinarios sobre los cuatro promedios experimentales a 28 días, obteniendo los siguientes pares de datos: (0 %, 39.58 MPa), (4 %, 30.88 MPa), (5 %, 23.64 MPa) y (6 %, 22.49 MPa). A partir de estos valores se calculó la pendiente del modelo como:

$$b_1 = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum(x_i - \bar{x})^2} = -\frac{60.58}{20.75} = -2.92 \text{ MPa/\%} \quad (1)$$

y el intercepto como:

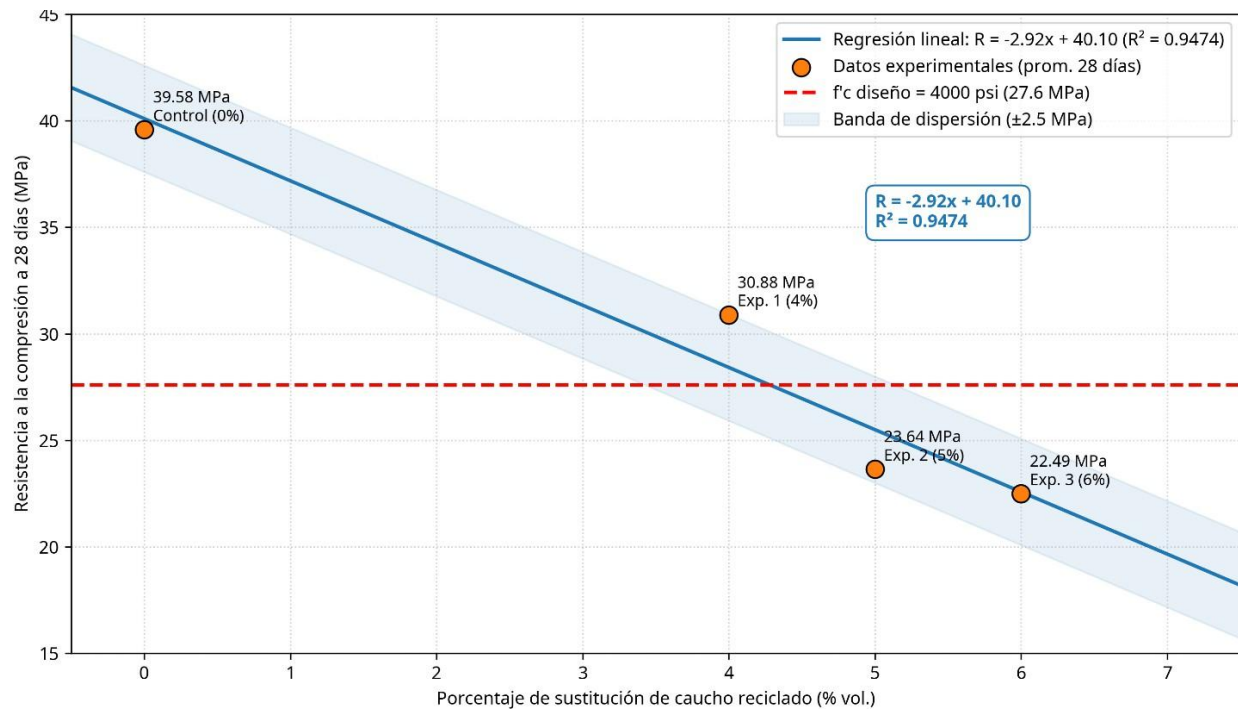
$$b_0 = \bar{y} - b_1 * \bar{x} = 29.15 - (-2.92 * 3.75) = 40.10 \text{ MPa} \quad (2)$$

Lo que resulta en la ecuación predictiva: $R = -2.92x + 40.10$, donde R representa la resistencia en MPa y x el porcentaje de caucho. El coeficiente de determinación (R^2) obtenido fue de 0.9474, lo que indica una correlación negativa excepcionalmente fuerte y casi perfectamente lineal dentro del rango estudiado (0 % a 6 %).

Este modelo predictivo sugiere que, por cada 1 % adicional de caucho incorporado como reemplazo de la arena, la resistencia a la compresión disminuye en aproximadamente 2.92 MPa. La alta confiabilidad de este modelo ($R^2 > 0.90$) resulta invaluable para futuras aplicaciones de ingeniería, ya que permite a los diseñadores de mezclas predecir con precisión la resistencia final del material basándose únicamente en la tasa de dosificación del residuo polimérico, facilitando la optimización de mezclas para requerimientos estructurales específicos, como el diseño de 4000 psi (27.6 MPa) evaluado en esta investigación, como el diseño de 4000 psi (27.6 MPa) evaluado en esta investigación. La representación gráfica de este modelo y su ajuste a los datos experimentales se presenta en la **Gráfica 2** Modelo de regresión lineal simple para la predicción de la resistencia a la compresión a los 28 días en función del porcentaje de sustitución de caucho reciclado.

Gráfica 2

Modelo de regresión lineal simple para la predicción de la resistencia a la compresión a los 28 días en función del porcentaje de sustitución de caucho reciclado



Propuesta de solución a la problemática

Situación actual

La gestión de neumáticos fuera de uso (NFU) representa uno de los desafíos ambientales más apremiantes de la actualidad. En Colombia, la rápida expansión del parque automotor ha generado un volumen de residuos poliméricos que supera ampliamente la capacidad instalada de las plantas de reciclaje y valorización. La disposición final de estos materiales se realiza predominantemente en vertederos a cielo abierto o mediante incineración no controlada, prácticas que liberan compuestos orgánicos volátiles, metales pesados y gases de efecto invernadero a la atmósfera, además de contaminar los mantos freáticos mediante la lixiviación de aditivos tóxicos.

Paralelamente, el sector de la construcción, motor fundamental de la economía nacional, mantiene un modelo de producción lineal altamente dependiente de la extracción de recursos naturales no renovables. La explotación intensiva de canteras y lechos de ríos para la obtención de agregados pétreos, especialmente arena, ha provocado una severa degradación de los ecosistemas acuáticos, alterando la dinámica de los cauces y amenazando la biodiversidad local. Esta dualidad

de problemáticas, la acumulación masiva de residuos poliméricos y el agotamiento acelerado de los recursos pétreos, configura un escenario de insostenibilidad que exige intervenciones tecnológicas inmediatas y escalables, como la incorporación de caucho reciclado en mezclas de concreto de 4000 psi (27.6 MPa) evaluada en este estudio.

Oportunidades

Frente a este panorama, la convergencia entre la industria del reciclaje y el sector de la construcción ofrece oportunidades sin precedentes para la implementación de modelos de economía circular. La principal oportunidad radica en la compatibilidad volumétrica entre el caucho granulado y los agregados finos tradicionales. Dado que el concreto es el material de construcción más utilizado a nivel mundial, incluso porcentajes de sustitución bajos (como el 4 %, 5 % y 6 % evaluados en este estudio) representan volúmenes masivos de neumáticos desviados de los vertederos cuando se aplican a escala industrial.

Además, la normativa técnica colombiana e internacional ha comenzado a flexibilizar sus criterios para permitir la incorporación de materiales alternativos en elementos no estructurales, abriendo un nicho de mercado significativo para el concreto modificado. Otra oportunidad técnica destacable es el aprovechamiento de las propiedades intrínsecas del caucho, tales como su baja densidad, alta elasticidad y capacidad de absorción acústica y térmica. Estas características permiten el desarrollo de concretos aligerados con propiedades de aislamiento mejoradas y mayor resistencia al impacto, ideales para aplicaciones urbanas específicas como barreras separadoras, andenes, ciclorrutas y paneles prefabricados de cerramiento, donde la resistencia a la compresión de 4000 psi (27.6 MPa) no es el factor crítico de diseño.

Propuesta de solución al problema planteado

Con base en los hallazgos experimentales y el análisis del contexto, se propone la estandarización y comercialización de una mezcla de concreto ecológico tipo C-4000 (27.6 MPa) que incorpore un 4 % de sustitución volumétrica de arena por caucho granulado (0.5 a 2.0 mm) sin pretratamiento químico. Esta dosificación específica se selecciona como la solución óptima debido a que garantiza una resistencia promedio de 30.88 MPa a los 28 días, superando el umbral de seguridad estructural de 4000 psi, al tiempo que maximiza la viabilidad económica al eliminar

los costos asociados a los tratamientos superficiales del polímero (como lavados con NaOH o recubrimientos con sílice).

La implementación de esta propuesta requiere una estrategia de integración en tres fases:

1. **Fase de suministro:** Creación de alianzas estratégicas entre las plantas trituradoras de neumáticos y las concreteiras locales, estableciendo una cadena de suministro estable que garantice la granulometría y limpieza del caucho.
2. **Fase de producción:** Introducción del material en el portafolio de productos prefabricados no estructurales (adoquines, bordillos, bloques divisorios y topellantas), donde el control de calidad en planta minimiza los riesgos de segregación durante el vaciado.
3. **Fase de certificación:** Articulación con entidades gubernamentales y certificadoras de construcción sostenible (como el Consejo Colombiano de Construcción Sostenible) para que el uso de este concreto otorgue puntos adicionales en certificaciones ambientales como LEED o EDGE, incentivando económicamente a las constructoras a adoptar el material.

Esta solución integral no solo resuelve el problema técnico de la disposición de los NFU, sino que reduce directamente la huella de carbono de los proyectos constructivos, disminuye la presión sobre las canteras de arena de río y fomenta la creación de empleos verdes en la cadena de valor del reciclaje, consolidando un modelo de desarrollo verdaderamente sostenible para la infraestructura urbana del país.

Plan de divulgación

Tipo de producto y objetivo de la divulgación

El producto principal derivado de esta investigación es un artículo científico original, estructurado bajo los estándares internacionales de publicación académica y redactado conforme a las normas APA 7ma edición. Este documento consolida los hallazgos experimentales sobre la viabilidad técnica de incorporar caucho reciclado en mezclas de concreto de 4000 psi (27.6 MPa). El objetivo central de la divulgación es transferir el conocimiento generado a la comunidad académica y a los actores de la industria constructora, demostrando la viabilidad de prácticas de economía circular en proyectos de infraestructura urbana no estructural.

Canales de divulgación seleccionados

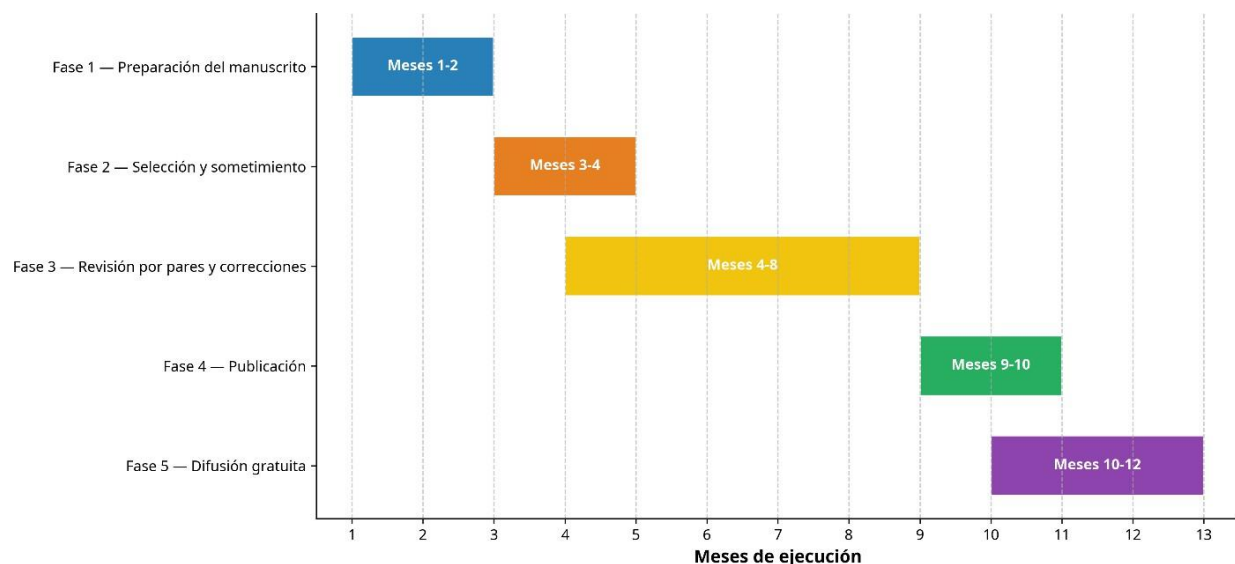
Para garantizar el alcance de la investigación sin incurrir en costos de publicación, se priorizará la postulación del artículo a revistas científicas indexadas que operen bajo el modelo de acceso abierto. Además de canales secundarios, se contempla la presentación de los resultados en eventos académicos gratuitos o de bajo costo, como simposios universitarios locales o encuentros de semilleros de investigación. Asimismo, se utilizarán repositorios institucionales y redes académicas gratuitas (ResearchGate, Academia.edu) para maximizar la visibilidad del documento una vez publicado.

Cronograma estimado de ejecución

El plan de divulgación se estructura en un horizonte temporal de doce meses, dividido en cinco fases estratégicas que abarcan desde la preparación final del manuscrito hasta la difusión activa de los resultados, tal como se ilustra en la **Gráfica 3**.

Gráfica 3

Cronograma estimado de ejecución del plan de divulgación



Nota. Las duraciones son estimadas y pueden variar según los tiempos editoriales de la revista seleccionada.

Recursos necesarios

La ejecución de este plan se basará exclusivamente en recursos propios y herramientas de acceso libre, garantizando su viabilidad sin requerir financiamiento externo. El recurso humano estará conformado por los autores de la investigación, quienes asumirán las labores de redacción, corrección de estilo y gestión editorial. Los recursos técnicos se limitarán al uso de software de procesamiento de texto, herramientas gratuitas de gestión bibliográfica (Mendeley) y el acceso a internet para el sometimiento del manuscrito a través de las plataformas OJS (Open Journal Systems) de las revistas seleccionadas. No se contempla la asignación de presupuesto para traducciones profesionales, viáticos o pagos por publicación.

Posibles aliados institucionales

Para potenciar el alcance de la investigación, se buscará el respaldo académico de la Universidad EAN, utilizando sus canales de difusión interna y repositorios institucionales. Adicionalmente, se intentará establecer contacto informativo con el Consejo Colombiano de Construcción Sostenible (CCCS) y entidades locales de gestión ambiental, enviando el artículo publicado como material de consulta técnica que evidencie la viabilidad del uso de materiales reciclados, sin que esto implique compromisos financieros o convenios formales.

Resultados esperados e impacto

En el ámbito académico, se espera lograr la publicación del artículo en una revista indexada, contribuyendo a la línea de investigación en materiales sostenibles de la institución y generando referencias verificables a mediano plazo. En términos de impacto social y ambiental, la divulgación de estos hallazgos busca desmitificar el uso de materiales reciclados en la construcción, demostrando con datos empíricos que es posible mantener los estándares de seguridad estructural (4000 psi / 27.6 MPa) mientras se reduce la huella ecológica. A largo plazo, se espera que la visibilidad de esta investigación sirva como antecedente técnico para que las concreteras locales consideren el desarrollo de líneas comerciales de concreto ecológico, facilitando el aprovechamiento de neumáticos fuera de uso.

Conclusiones

La presente investigación demuestra que la incorporación de caucho reciclado como sustituto parcial del agregado fino es una alternativa técnicamente viable para la producción de concretos sostenibles, siempre que se mantengan porcentajes de sustitución bajos. Los resultados experimentales indican que la mezcla con 4 % de caucho es la única que logra cumplir con el requerimiento estructural de 4000 psi (27.6 MPa), alcanzando una resistencia promedio de 30.88 MPa a los 28 días. Por el contrario, las sustituciones del 5 % y 6 % provocan caídas de resistencia que sitúan al material por debajo de los límites aceptables para aplicaciones estructurales convencionales.

Desde el punto de vista estadístico, el análisis de varianza (ANOVA) y las pruebas de Tukey confirmaron que el impacto del caucho sobre la matriz cementante es significativo y predecible. El modelo de regresión lineal obtenido ($R^2 = 0.9474$) permite establecer una correlación directa entre la dosis de residuo y la pérdida de capacidad de carga, facilitando la optimización de futuras mezclas. Asimismo, se observó que, aunque ninguna mezcla modificada alcanzó el 85 % de la resistencia del control, la mejora en la ductilidad y el patrón de falla menos frágil representan ventajas competitivas para elementos de infraestructura urbana no estructural.

Finalmente, se concluye que el uso de caucho granulado sin pretratamiento químico ofrece un equilibrio óptimo entre desempeño mecánico, viabilidad económica y beneficio ambiental. Esta práctica no solo contribuye a la mitigación de la contaminación por neumáticos fuera de uso, sino que promueve la economía circular en el sector de la construcción. Se recomienda para futuras investigaciones explorar el uso de aditivos de última generación que permitan mejorar la adherencia en la zona de transición interfacial (ITZ), buscando incrementar los porcentajes de sustitución sin comprometer la integridad estructural del material.

Bibliografía

- Abunassar, N., & Alas, M. (2025). Optimization of strength and durability properties of rubberized concrete mixtures containing silica fume using Taguchi method. *Construction and Building Materials*, 468, 140455.
<https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2025.140455>
- Agrawal, D., Waghe, U., Ansari, K., Dighade, R., Amran, M., Qader, D. N., & Fediuk, R. (2023). Experimental effect of pre-treatment of rubber fibers on mechanical properties of rubberized concrete. *Journal of Materials Research and Technology*, 23, 791–807.
<https://doi.org/10.1016/J.JMRT.2023.01.027>
- Alizadeh, M., Eftekhari, M. R., Asadi, P., & Mostofinejad, D. (2024). Enhancing the mechanical properties of crumb rubber concrete through polypropylene mixing via a pre-mixing technique. *Case Studies in Construction Materials*, 21, e03569.
<https://doi.org/10.1016/J.CSCM.2024.E03569>
- ASTM International. (2021, March). *ASTM C39/C39M-21: Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens*. Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.02 – Concrete and Aggregates. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA. https://doi.org/10.1520/C0039_C0039M-21
- Camacol. (2023). *Informe económico 118*. www.camacol.co
- CCCS. (2024). *Estado de la construcción sostenible en Colombia 2024 (2ª ed.)*.
https://www.cccs.org.co/wp-content/uploads/2024/07/Estado_de_la_Construccion_Sostenible_2024pdf.pdf
- Dhivya, K., & Priyadarshini, K. (2022). Experimental study on strength properties of concrete with partial replacement of coarse aggregate by rubber tyre waste. *Materials Today: Proceedings*, 52, 1930–1934. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2021.11.578>
- Dou, Y., Feng, G., Xu, L., Yang, Y., Zhang, Z., You, L., Zhong, S., Gao, Y., & Cui, X. (2022). Modification of rubber particles and its application in rubberized concrete. *Journal of Building Engineering*, 51, 104346. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2022.104346>
- Eissa, M., Habib, A., Ausamah, ·, Houri, A. L., & Alibrahim, · Bashar. (2024). Recent efforts on investigating the effects of recycled rubber content on the mechanical properties of

structural concrete. *Discover Civil Engineering* 2024 1:1, 1(1), 16-.

<https://doi.org/10.1007/S44290-024-00017-7>

Ellen MacArthur Foundation. (2015). *Towards A Circular Economy: Business Rationale For An Accelerated Transition*. Ellen MacArthur Foundation, Isle of Wight, UK.

<https://content.ellenmacarthurfoundation.org/m/4384c08da576329c/original/Towards-a-circular-economy-Business-rationale-for-an-accelerated-transition.pdf>

Fernández de Monje, J., Colmenero Hidalgo, E., & Cruz Martínez, J. A. (2025). La arena como recurso: aplicaciones en la industria de la construcción e impactos ambientales derivados. *Ambiociencias*, (22), 19–30. <https://doi.org/10.18002/AMBIOC.I22.8617>

Han, X., Ding, N., Chen, A., Wang, Z., Xu, Y., Feng, L., Ji, Y., Li, K., Jing, J., Sun, S., & Zhang, Q. (2024). Experimental study on freeze-thaw failure of concrete incorporating waste tire crumb rubber and analytical evaluation of frost resistance. *Construction and Building Materials*, 439, 137356. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2024.137356>

He, L., Cai, H., Huang, Y., Ma, Y., Van Den Bergh, W., Gaspar, L., Valentin, J., Vasiliev, Y. E., Kowalski, K. J., & Zhang, J. (2021). Research on the properties of rubber concrete containing surface-modified rubber powders. *Journal of Building Engineering*, 35, 101991. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2020.101991>

Hisbani, N., Shafiq, N., Shams, M. A., Farhan, S. A., & Zahid, M. (2025). Properties of concrete containing crumb rubber as partial replacement of fine Aggregate-A review. *Hybrid Advances*, 10, 100481. <https://doi.org/10.1016/J.HYBADV.2025.100481>

ICONTEC. (2000, June 21). *NTC 550: Concretos. Elaboración y Curado de Especímenes de Concreto en Obra*. Norma Técnica Colombiana NTC 550, 2.^a actualización. https://www.academia.edu/38869298/NORMA_T%C3%89CNICA_COLOMBIANA_NTC_550

ICONTEC. (2010, February 17). *NTC 673: Concretos. Ensayo de Resistencia a la Compresión de Especímenes Cilíndricos de Concreto*. Norma Técnica Colombiana NTC 673, 3.^a actualización. Adopción idéntica de ASTM C39:2005. <https://silo.tips/download/norma-tecnica-colombiana-673>

- Jatoi, G. H., Loprencipe, G., & Moretti, L. (2025). Comparative Review of Marshall and Superpave Mix Designs: Enhancing Asphalt Performance with Polymers. *Materials*, 18(18), 4273. <https://doi.org/10.3390/MA18184273>
- Ji, Y., Qasem, M. G. S., Xu, T., & Mohammed, A. O. Y. (2024). Mechanical properties investigation on recycled rubber desert sand concrete. *Journal of CO2 Utilization*, 88, 102939. <https://doi.org/10.1016/J.JCOU.2024.102939>
- Kaewunruen, S., & Meesit, R. (2020). Eco-friendly high-strength concrete engineered by micro crumb rubber from recycled tires and plastics for railway components. *Advances in Civil Engineering Materials*, 9(1), 210–226. <https://doi.org/10.1520/ACEM20180058>
- Karunarathna, S., Linforth, S., Kashani, A., Liu, X., & Ngo, T. (2021). Effect of recycled rubber aggregate size on fracture and other mechanical properties of structural concrete. *Journal of Cleaner Production*, 314, 128230. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2021.128230>
- Liu, L., Wang, C., Liang, Q., Chen, F., & Zhou, X. (2023). A state-of-the-art review of rubber modified cement-based materials: Cement stabilized base. *Journal of Cleaner Production*, 392, 136270. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2023.136270>
- Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2014). Concrete: Microstructure, Properties, And Materials. In *McGraw-Hill Education*, New York, NY, USA. <https://vdoc.pub/download/concrete-microstructure-properties-and-materials-12ud4i0n4h1g>
- Merli, R., Preziosi, M., Acampora, A., Lucchetti, M. C., & Petrucci, E. (2020). Recycled fibers in reinforced concrete: A systematic literature review. *Journal of Cleaner Production*, 248, 119207. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2019.119207>
- 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). <https://doi.org/10.1515/SECM-2025-0060/XML>
- Neville, A. M. (2011). Properties of concrete. In *Pearson Education Limited*, Harlow, Essex, England (5th ed.). Pearson Education Limited. https://api.pageplace.de/preview/DT0400.9780273786313_A23613766/preview-9780273786313_A23613766.pdf

- Programme, U. N. E. (2022). *Sand and Sustainability: 10 Strategic Recommendations to Avert a Crisis*. United Nations Environment Programme.
<https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/38362>
- Qureshi, M., Li, J., Wu, C., & Sheng, D. (2024). Mechanical strength of rubberized concrete: Effects of rubber particle size, content, and waste fibre reinforcement. *Construction and Building Materials*, 444, 137868. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2024.137868>
- Rangel-Buitrago, N., Neal, W. J., & Galgani, F. (2026). From roads to oceans: Pollution pathways of end-of-life tires in coastal and marine environments. *Marine Pollution Bulletin*, 226, 119355. <https://doi.org/10.1016/J.MARPOLBUL.2026.119355>
- Saloni, Parveen, Pham, T. M., Lim, Y. Y., & Malekzadeh, M. (2021). Effect of pre-treatment methods of crumb rubber on strength, permeability and acid attack resistance of rubberised geopolymer concrete. *Journal of Building Engineering*, 41, 102448.
<https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2021.102448>
- Shahzad, K., & Zhao, Z. (2022). Experimental study of NaOH pretreated crumb rubber as substitute of fine aggregate in concrete. *Construction and Building Materials*, 358, 129448.
<https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2022.129448>
- STM International, C. D. (2024). ASTM D1895-24: tandard Test Methods for Apparent Density, Bulk Factor, and Pourability of Plastic Materials. *ASTM D1895-24*. DOI: 10.1520/D1895-24. <https://doi.org/10.1520/D1895-24>
- Sun, S., Han, X., Chen, A., Zhang, Q., Wang, Z., & Li, K. (2023). Experimental Analysis and Evaluation of the Compressive Strength of Rubberized Concrete During Freeze–Thaw Cycles. *International Journal of Concrete Structures and Materials* 2023 17:1, 17(1), 28-.
<https://doi.org/10.1186/S40069-023-00592-6>
- 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>
- Vasudevan, A. A., Mohammed, B. S., & Bheel, N. (2026). Influence of Multi-Walled Carbon Nanotubes on the Mechanical and Deformation Performance of Polymer-Modified Crumb Rubber Concrete. *Polymers* 2026, Vol. 18, Page 503, 18(4), 503.
<https://doi.org/10.3390/POLYM18040503>

- Yasser, N., Abdelrahman, A., Kohail, M., & Moustafa, A. (2023). Experimental investigation of durability properties of rubberized concrete. *Ain Shams Engineering Journal*, 14(6), 102111. <https://doi.org/10.1016/J.ASEJ.2022.102111>
- Zarhri, Z., Rosado Martinez, W., Dominguez Lepe, J., Vega-Azamar, R. E., Chan Juarez, M., & Pamplona Solis, B. (2022). 30 years of rubberized concrete investigations (1990-2020). A bibliometric analysis. *Revista Alconpat*, 12(1), 127–142. <https://doi.org/10.21041/RA.V12I1.554>
- Zhang, Z., Ma, Q., Huang, W., Zhou, B., Zheng, Z., Lu, Q., Du, G., & Zhang, J. (2025). Study on the performance of rubber concrete mixed with different supplementary cementitious materials after high-temperature. *Journal of Building Engineering*, 114, 114344. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2025.114344>