

Influence of Rubber Addition on the Mechanical Properties of Concrete Applied to Sidewalks on Av. 15 de Julio – Ate, 2024

Bejar Herrera Luis¹; Pumacayo Quispe Joel²

^{1,2}Universidad Tecnológica del Perú, Perú, 1613366@utp.edu.pe, U19313454@utp.edu.pe

***Abstract**– The purpose of this research is to optimize the mechanical properties of concrete for sidewalks by partially replacing cement with recycled granular rubber (CGR) in proportions of 1%, 3%, and 5%, following ASTM and NTP standards. Workability (Slump) and compressive strength tests were conducted on specimens measuring 0.10 m in diameter and 0.20 m in height, which were evaluated at 7, 14, and 28 days under water curing. The results revealed that CGR decreases the workability of concrete but remains within the permissible limits established by the standards. Additionally, it enhances compressive strength at 1% and 3% replacement levels, while at 5%, the strength was lower than that of the control concrete. Furthermore, the use of CGR led to a moderate cost reduction, offering an economically and environmentally sustainable solution for urban applications.*

***Keywords**– Rubber, cement, concrete, mechanical properties.*

Influencia de la Adición de Caucho sobre las Propiedades Mecánicas del Concreto Aplicado en Veredas en la Av. 15 de julio – Ate, 2024

Bejar Herrera Luis¹; Pumacayo Quispe Joel²

^{1,2}Universidad Tecnológica del Perú, Perú, 1613366@utp.edu.pe, U19313454@utp.edu.pe

Resumen– El propósito de la investigación fue optimizar las propiedades mecánicas del concreto destinado a veredas mediante la sustitución parcial del cemento por caucho granulado reciclado (CGR), en proporciones del 1%, 3% y 5%, con el fin de contribuir a la sostenibilidad en la construcción urbana. Se elaboraron 36 probetas cilíndricas de 10 cm de diámetro y 20 cm de altura, distribuidas equitativamente según el porcentaje de CGR, y se evaluaron a los 7, 14 y 28 días, bajo un régimen de curado en agua, de acuerdo con las normativas ASTM y NTP. Se llevaron a cabo ensayos de trabajabilidad mediante el método del asentamiento (slump) y ensayos de resistencia a la compresión para analizar el desempeño de las mezclas modificadas. Los resultados evidenciaron que la incorporación de CGR reduce ligeramente la trabajabilidad, aunque sin comprometer la manejabilidad ni salirse de los rangos normativos. En términos de resistencia a la compresión, las mezclas con 1% y 3% de CGR presentaron valores superiores al concreto patrón en algunas edades de curado, mientras que con 5% se observó una disminución significativa. Además, se identificó una reducción moderada en los costos de producción debido al menor consumo de cemento, lo que posiciona al CGR como un material viable desde el punto de vista técnico, económico y ambiental, especialmente en aplicaciones no estructurales como veredas urbanas.

Palabras clave: Rubber, cement, concrete, mechanical properties.

I. INTRODUCCIÓN

El concreto es un material esencial en la industria de la construcción debido a su resistencia, durabilidad y versatilidad [1]. Sin embargo, la creciente preocupación por la sostenibilidad y la necesidad de reducir el impacto ambiental han impulsado la búsqueda de alternativas que permitan optimizar sus propiedades mecánicas mientras se promueve una economía circular. Una de las soluciones más prometedoras es la incorporación de caucho granulado reciclado (CGR) proveniente de neumáticos fuera de uso (NFU), un residuo cuya gestión presenta grandes desafíos a nivel mundial [2]. En el Perú y el mundo, donde los neumáticos desechados representan una fuente significativa de contaminación [3,4], la incorporación de este material en mezclas de concreto ofrece una doble ventaja: por un lado, se reduce el volumen de residuos acumulados y, por otro, se exploran mejoras en las propiedades del concreto, como su trabajabilidad, resistencia a la compresión y costo de producción [5]. Estas características son especialmente relevantes en aplicaciones urbanas, como la construcción de veredas, donde se requiere un equilibrio entre eficiencia económica, sostenibilidad y desempeño estructural.

Estudios previos han demostrado que el tamaño y la proporción del caucho reciclado influyen directamente en las propiedades del concreto. Por ejemplo, tamaños de partícula más pequeños tienden a mejorar la resistencia mecánica, mientras que mayores contenidos de caucho pueden comprometerla [6,7]. A pesar de estos avances, es necesario analizar cómo estas variables impactan en contextos locales y proyectos específicos, como las veredas de la Av. 15 de Julio, en Ate, donde esta investigación se centra en evaluar el uso de caucho granulado como sustituto parcial del cemento en proporciones del 1%, 3% y 5%.

El presente estudio busca determinar cómo la adición de caucho granulado afecta las propiedades mecánicas del concreto, con énfasis en la trabajabilidad y la resistencia a la compresión, además de evaluar su impacto económico en la producción. Los ensayos se realizaron siguiendo normativas internacionales como ASTM y NTP, y los resultados obtenidos permitirán establecer directrices para el diseño de mezclas sostenibles que optimicen la calidad del concreto y contribuyan a la reducción de costos y a la mitigación del impacto ambiental. Este enfoque ofrece no solo una solución técnica, sino también una oportunidad para fomentar prácticas innovadoras en la industria de la construcción en el Perú.

II. METODOLOGÍA

La presente investigación sigue un enfoque cuantitativo, experimental y explicativo porque pretende comprender las relaciones entre distintas variables [8,9], con el objetivo de analizar el impacto de la incorporación de caucho granulado como sustituto parcial del cemento en las propiedades mecánicas del concreto. La metodología se estructuró en varias etapas clave, desde la formulación del problema hasta la obtención de conclusiones fundamentadas en los resultados experimentales.

Primero, se planteó la pregunta de investigación: ¿Cómo afecta la inclusión de caucho granulado reciclado a las propiedades mecánicas y costos de producción del concreto utilizado en veredas? A partir de esta interrogante, se diseñaron los objetivos generales y específicos, delimitando el alcance de la investigación en términos de proporciones de caucho (1%, 3% y 5%), propiedades evaluadas (trabajabilidad y resistencia a la compresión) y el análisis económico. El desarrollo experimental se llevó a cabo en un laboratorio siguiendo las normativas ASTM y NTP aplicables. Para evaluar la resistencia

a la compresión, se elaboraron 36 probetas cilíndricas de concreto (10×20 cm), distribuidas en cuatro grupos según el porcentaje de caucho granulado usado como reemplazo parcial del cemento: 0%, 1%, 3% y 5%. Cada grupo estuvo conformado por 9 probetas, las cuales se subdividieron en tres subgrupos de tres unidades, ensayadas a los 7, 14 y 28 días de curado, respectivamente. Este diseño experimental permitió analizar el comportamiento de la resistencia a lo largo del tiempo y entre los distintos porcentajes de adición. La metodología utilizada para definir esta población sigue lo propuesto por el autor [10]. La investigación se centró en las siguientes etapas metodológicas:

A) Materiales Utilizados

- *Cemento:* Se utilizó cemento Portland, de uso general.
- *Agregados:* Se emplearon agregados finos y gruesos, seleccionados según la normativa ASTM.
- *Caucho Granulado:* Proveniente de neumáticos reciclados, tamizado hasta un tamaño de partícula entre 2-5 mm.
- *Agua:* Agua potable utilizada en la mezcla según la norma ASTM.
- *Equipo de laboratorio:* mezcladora de concreto, moldes metálicos cilíndricos, vibrador de concreto, máquina de compresión hidráulica, entre otros.

B) Diseño de Mezcla

Se utilizó el método ACI 211.1 para el diseño de mezclas, ajustando las proporciones de los componentes en función de los requerimientos de trabajabilidad y resistencia. Las mezclas incluyeron cemento, agregados, agua y caucho granulado en proporciones de 1%, 3% y 5% respecto al peso del cemento

C) Procedimiento Experimental

1) Preparación de Materiales:

- Como se observa en la Fig. 1, el caucho granulado fue tamizado y secado antes de su incorporación en la mezcla.
- Se realizó un análisis granulométrico de los agregados para garantizar su distribución adecuada.

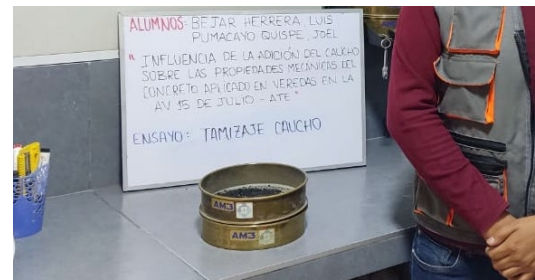


Fig. 1 Tamizaje del caucho granulado

2) Elaboración de Mezclas:

- En la Fig. 2 se observa la fabricación de 36 probetas cilíndricas ($10 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$), distribuidas según los diferentes niveles de sustitución de caucho.
- Se empleó una mezcladora de tambor para homogenizar los materiales.



Fig. 2 Vaciado de probetas cilíndricas.

3) Ensayos en Estado Fresco:

Para evaluar la trabajabilidad, se realizó el ensayo de cono de Abrams (ASTM C143 / NTP 339.035), como se muestra en la Fig. 3, registrando el asentamiento de las mezclas.



Fig. 3 Ensayo de Cono de Abrams.

4) Curado y Ensayos en Estado Endurecido:

- Las probetas fueron curadas en agua a 23°C según ASTM C511.

- Las probetas fueron curadas en agua durante 7, 14 y 28 días. Luego, se realizó el ensayo de resistencia a la compresión (ASTM C39-07 / NTP 339.034) en cada grupo. En la Fig. 4 se observa una de las probetas sometida a este ensayo, registrando los valores máximos de carga soportada.



Fig. 4 Rotura de probetas de concreto.

D) Validación y Comparación con Estudios Previos

Para validar los resultados, se compararon con investigaciones anteriores sobre concreto con agregados reciclados. Se analizaron similitudes y diferencias con estudios internacionales que han empleado CGR en pavimentos urbanos.

E) Análisis Económico

Se calcularon los costos de producción de concreto por metro cúbico para cada diseño, considerando el costo del caucho granulado y las cantidades de cemento reemplazadas. Finalmente, los datos obtenidos fueron analizados y presentados mediante tablas y gráficos comparativos, destacando la influencia del caucho granulado en la trabajabilidad, resistencia y costos. La discusión de los resultados permitió establecer conclusiones sobre el uso óptimo de caucho en mezclas de concreto, promoviendo su aplicación en proyectos urbanos sostenibles.

III. RESULTADOS

A) Trabajabilidad del concreto

A partir de los ensayos realizados se pudo elaborar la siguiente tabla, en el cual se aprecia la trabajabilidad de los concretos

diseñados. Los resultados indicaron que a medida que se incrementa el porcentaje de caucho granulado en la mezcla, el asentamiento disminuye. Esto se debe a la menor cohesión entre las partículas de caucho y la matriz cementicia, lo que reduce la fluidez de la mezcla.

En la Fig. 4, se observa que el concreto sin adición de CGR presentó el mayor asentamiento, mientras que la mezcla con 5% de caucho registró la menor trabajabilidad. Esta tendencia es consistente con investigaciones previas que reportan que la inclusión de caucho disminuye la fluidez de la mezcla debido a su baja densidad y capacidad de absorción de agua.

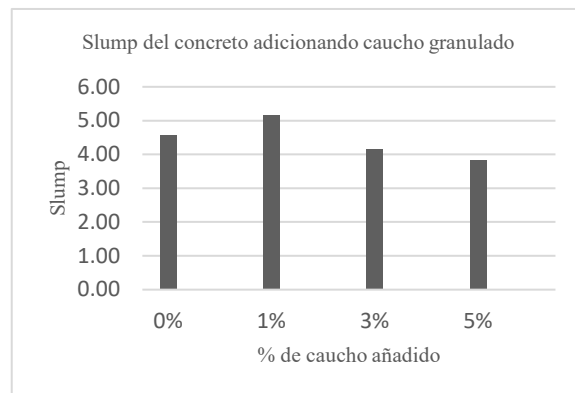


Fig. 4 Gráfico de barras de slump del concreto.

B) Ensayo del concreto en estado endurecido

A continuación, se presentan los resultados de las pruebas de rotura de concreto o también ensayo de resistencia mecánica a la compresión de concreto. Las pruebas fueron realizadas a los 7, 14 y 28 días después del vaciado de la mezcla.

Los datos de la Figura 5 indican que, a los 7 días, las mezclas con 1% y 3% de CGR presentan un leve incremento en la resistencia a la compresión en comparación con el concreto patrón, mientras que la mezcla con 5% muestra una ligera disminución.

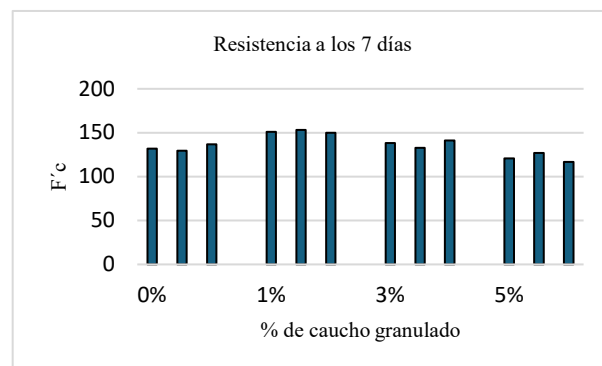


Fig. 5 Gráfico de barras del ensayo de resistencia a la compresión a los 7 días.

A los 14 días, como se observa en la Fig. 6, la mezcla con 1% de CGR mantuvo valores superiores al concreto patrón, mientras que la del 3% presentó una mejora leve. En contraste, la mezcla con 5% de CGR mostró una reducción en la resistencia.

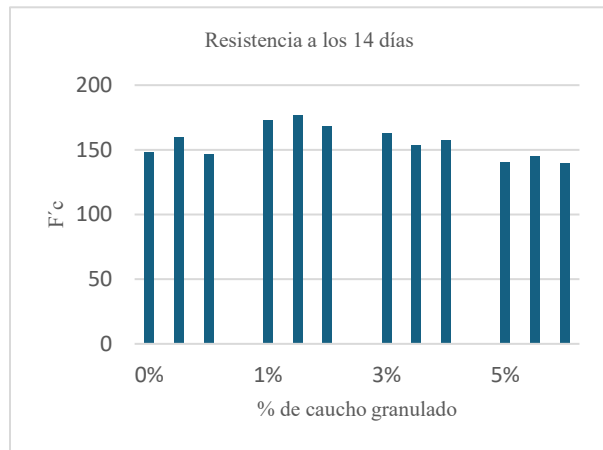


Fig. 6 Gráfico de barras del ensayo de resistencia a la compresión a los 14 días.

Los resultados presentados en la Fig. 7 muestran que, a los 28 días, la resistencia de la mezcla con 1% de CGR es la más alta, lo que indica que en bajas proporciones el caucho puede mejorar la capacidad estructural del concreto. En contraste, la mezcla con 5% de CGR presenta una resistencia inferior a la del concreto de referencia, lo que sugiere una limitación en su aplicación estructural.

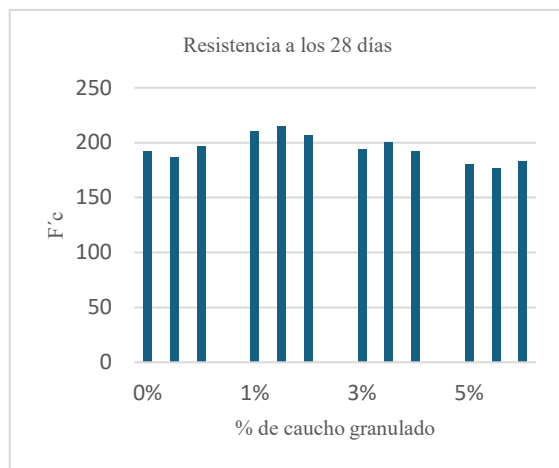


Fig. 7 Gráfico de barras del ensayo de resistencia a la compresión a los 28 días.

A continuación, en la Tabla I se muestra los resultados de la variación de la resistencia en porcentaje a los 28 días respecto al patrón.

TABLA I
VARIACIÓN DE LA RESISTENCIA EN % A LOS 28 DÍAS

Adición de caucho granulado (%)	Resistencia kg/cm2	F'c (patrón)kg/cm2	% F'c
1	210.61	191.87	109.77%
3	195.61	191.87	101.95%
5	179.87	191.87	93.75%

C) Análisis de costo de producción de concreto por m³

Se realizó un análisis del costo de producción del caucho granulado reciclado con el propósito de sustituir el 1% del cemento en cada metro cúbico de concreto. En la Tabla II se presenta el costo del caucho granulado para este diseño de sustitución, mientras que en la Tabla III se detallan los costos del cemento para la misma proporción de reemplazo. En la Tabla IV se muestra la variación del costo del caucho granulado y el cemento, evidenciando una disminución de 0.42 soles por metro cúbico de concreto.

Finalmente, considerando la cantidad de concreto utilizada por kilómetro, como se observa en la Tabla V, se obtiene un ahorro aproximado de 62.92 soles por cada kilómetro de vereda construida. Este cálculo se basa en una sustitución del 1% de cemento y en una vereda promedio de 1.5 m de ancho y 10 cm de espesor, por lo que puede variar dependiendo de las condiciones del proyecto.

TABLA II
COSTO DE CAUCHO PARA DISEÑO DE SUSTITUCIÓN DEL 1% DE 1M³ DE CONCRETO

Costo por tonelada	Costo por kg	Cantidad de caucho, en sustitución de 1% del cemento, en kg	Costo de producción de 1% de caucho x m3
S/ 600.00	S/ 0.60	3.26	S/ 1.96

TABLA III
COSTO DE CEMENTO PARA DISEÑO DE SUSTITUCIÓN DE 1% EN
1M3 DE CONCRETO

Costo de 42.5 kg cimento (1 bls)	Kg de sustitución de 1%	Costo de 1% de cimento
S/ 31.00	3.26	S/ 2.38

TABLA IV
VARIACIÓN DE COSTO DE CAUCHO GRANULADO Y CEMENTO

Caucho reciclado (S/.)	Cemento (S/.)	Variación
S/ 1.96	S/ 2.38	S/ 0.42

TABLA V
AHORRO POR KILOMETRO

Cantidad de concreto Km/m3	Variación	Ahorro por Km
150	S/ 0.42	S/ 62.92

Al aumentar la proporción de caucho granulado del 1% al 3% como sustituto parcial del cemento, se obtiene un mayor ahorro económico debido a la reducción en el uso de cemento. En términos de resistencia a la compresión, la mezcla con 3% también presenta una mejora respecto al concreto patrón. Sin embargo, este aumento es menor que el observado en la mezcla con 1% de caucho. Por lo tanto, desde una perspectiva económica, el 3% representa una alternativa más eficiente en cuanto a costos, aunque con una ganancia mecánica inferior a la lograda con el 1%.

En general, estos resultados indican que, además de los beneficios ambientales, la incorporación de caucho granulado reciclado representa una alternativa viable para la reducción de costos en proyectos urbanos, siempre considerando un equilibrio entre economía y desempeño estructural.

IV. DISCUSIONES

El primer objetivo específico de esta investigación consiste en examinar el impacto de la incorporación de caucho granulado como sustituto parcial del cemento en la trabajabilidad del concreto destinado a veredas, utilizando proporciones de 1%, 3% y 5% en la Av. 15 de Julio – Ate, 2024. La trabajabilidad del hormigón es una propiedad fundamental del estado fresco, que determina la facilidad con la que puede mezclarse,

colocarse y compactarse sin segregar sus componentes. Depende en gran medida de las características de las materias primas utilizadas, ya que estas influyen tanto en la resistencia interna de la mezcla como en su interacción con los encofrados y refuerzos [11]. En este sentido, el presente ensayo se llevó a cabo siguiendo la metodología propuesta por el autor [12]. Los hallazgos de esta investigación revelaron una relación inversamente proporcional entre la cantidad de caucho granulado reciclado utilizado y la trabajabilidad del concreto, la disminución en la trabajabilidad observada con mayores porcentajes de CGR (Fig. 4) puede explicarse por la naturaleza hidrofóbica y la baja densidad del caucho, que dificultan una mezcla homogénea. Al no absorber agua ni integrarse fácilmente con el cemento, el caucho reduce la fluidez de la mezcla y la hace menos manejable [12, 15], es decir, a mayor sustitución de cemento por caucho, menor trabajabilidad. Esta conclusión es similar a los resultados de [13], quien observó que a medida que aumentaba el porcentaje de caucho, la trabajabilidad disminuía. Sin embargo, esta reducción en la trabajabilidad no sugiere una disminución negativa en las características mecánicas del concreto en estado fresco. Un concreto altamente trabajable puede presentar un mayor riesgo de segregación, lo cual puede afectar negativamente la resistencia final del concreto. Por lo tanto, un equilibrio adecuado en la trabajabilidad es crucial para garantizar tanto la manejabilidad durante la colocación como la integridad estructural del concreto una vez endurecido.

Como segundo objetivo específico se planteó la evaluación de la resistencia a la compresión del concreto mediante la aplicación de caucho granulado reciclado (CGR), comparándolo con concreto convencional, en las veredas de la Av. 15 de Julio – ATE, 2024. La resistencia a la compresión es uno de los principales criterios para determinar la calidad del concreto, ya que define su capacidad para soportar cargas y, en consecuencia, su desempeño estructural. En esta investigación se observó que la inclusión de CGR también afecta la distribución de vacíos (poros) en la mezcla. Según [11] y [15], las partículas de caucho, al ser más blandas y menos densas que los agregados minerales tradicionales, no contribuyen significativamente a la rigidez de la mezcla, lo que puede disminuir su densidad en estado fresco. Esto coincide con los resultados obtenidos: con un 1% a 3% de CGR, las partículas se distribuyen de manera más homogénea y pueden ocupar algunos espacios vacíos sin comprometer la calidad del concreto. Sin embargo, al aumentar al 5%, se comienza a observar segregación, es decir, los componentes de la mezcla tienden a separarse. Esto afecta la compactación y la uniformidad, tal como también se evidenció en los resultados del ensayo de asentamiento (Slump). Por su parte, [14], en su estudio “Propiedades mecánicas del hormigón de cemento con polvo de caucho residual”, evaluó la resistencia a la compresión de concretos con 5%, 10% y 15% de caucho reciclado como

reemplazo parcial del cemento. Sus conclusiones señalan que tanto el tamaño de partícula como la cantidad de caucho influyen significativamente en las propiedades mecánicas. A mayor contenido, disminuyen la resistencia a la compresión, la resistencia a la flexión y el módulo elástico dinámico; mientras que tamaños de partícula más grandes también reducen estas propiedades. No obstante, el mismo estudio destaca que un mayor contenido y un tamaño más fino del caucho mejoran la resistencia al impacto y al agrietamiento. Estos hallazgos, en comparación con nuestra investigación, refuerzan la idea de que incorporar CGR en proporciones moderadas (1% y 3%) puede mejorar ciertas propiedades mecánicas del concreto sin afectar negativamente su desempeño. Sin embargo, superar ese umbral (como el 5%) puede debilitar la mezcla. Por ello, resulta esencial optimizar la dosificación para aprovechar los beneficios del material reciclado sin comprometer la calidad del concreto.

El tercer objetivo específico de esta investigación fue determinar la reducción del costo de fabricación del concreto mediante la adición de caucho granulado reciclado como sustituto parcial del cemento en las veredas de la Av. 15 de Julio, Ate, 2024. La economía circular busca optimizar el uso de recursos y reducir residuos. En este estudio, la sustitución del 1 % de cemento por caucho granulado resultó en una disminución de 0.42 soles por metro cúbico de concreto, lo que demuestra su impacto económico positivo en grandes cantidades de producción. Además, considerando que en un kilómetro de vereda se utilizan aproximadamente 150 m³ de concreto, la reducción total en costos por kilómetro es de S/ 62.92, lo que resalta los beneficios económicos y sustentables de esta práctica.

Finalmente, estudios previos han demostrado el potencial del CGR en aplicaciones de concreto, aunque con enfoques distintos al propuesto en esta investigación. Por ejemplo, [2] optimizaron mezclas con altos porcentajes de caucho granular (hasta 20%) para pavimentos rígidos, logrando una mejor resistencia al impacto, aunque con reducciones significativas en la resistencia a compresión. En contraste, los resultados de este estudio indican que porcentajes mínimos (1–3% de CGR) mejoran la resistencia a compresión en veredas, donde los requisitos de carga son menores y se prioriza la viabilidad económica. Por otro lado, mientras [12] emplearon partículas de caucho granulado de tamaños variables (1–10 mm) en elementos estructurales, lo que requirió ajustes en la proporción agua/cemento, nuestro uso de granulometría controlada (2–5 mm) permitió mantener la trabajabilidad sin modificar dicha relación, simplificando la producción en obra. Esta adaptación de parámetros, porcentajes reducidos y granulometría específica evidencia la viabilidad de nuestra propuesta para proyectos de infraestructura urbana en el Perú, especialmente

en contextos donde se busca equilibrar innovación, costos y facilidad de implementación.

IV. CONCLUSIONES

Este estudio confirmó que la incorporación de caucho granulado como sustituto parcial del cemento en las veredas del A.H. Huaycán, Av. 15 de Julio, Ate (2024), mejora la trabajabilidad del concreto. Los resultados obtenidos cumplen con los estándares de la norma ACI 211, garantizando una mezcla adecuada para su aplicación en obra. Asimismo, se determinó que la resistencia a la compresión del concreto aumenta con la inclusión de caucho granulado en proporciones del 1% y 3%, logrando mejoras del 9.77% y 1.95%, respectivamente, en comparación con el diseño patrón. Sin embargo, un contenido mayor podría comprometer la resistencia estructural, lo que resalta la importancia de definir un porcentaje óptimo de sustitución. En términos económicos, se evidenció que el uso de caucho granulado reciclado permite reducir los costos de producción del concreto. Específicamente, la sustitución del 1% del cemento generó un ahorro de 0.42 soles por metro cúbico, lo que representa un impacto positivo en proyectos de gran escala.

Finalmente, esta investigación se alinea con los lineamientos de la *Hoja de Ruta Nacional de Economía Circular al 2030*, promovida por el Ministerio del Ambiente (MINAM), la cual impulsa el uso eficiente de los recursos y la reutilización de residuos en distintos sectores, incluyendo la construcción. La incorporación de caucho granulado reciclado (CGR) como sustituto parcial del cemento no solo representa una mejora técnica y económica para aplicaciones urbanas, sino que también aporta al desarrollo de una infraestructura más sostenible y responsable con el medio ambiente, en coherencia con los principios de la economía circular establecidos a nivel nacional.

REFERENCES

- [1] R. Anjali and G. Venkatesan, "Optimization and prediction of mechanical properties of composite concrete with crumb rubber using RSM and hybrid DNN-HHO algorithm," *Journal of Building Engineering*, vol. 84, May 2024, doi: 10.1016/j.jobe.2024.108486.
- [2] S. Raffoul, R. Garcia, K. Pilakoutas, M. Guadagnini, and N. F. Medina, "Optimisation of rubberised concrete with high rubber content: An experimental investigation," *Constr Build Mater*, vol. 124, pp. 391–404, Oct. 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.07.054.
- [3] P. Arroyave, G. Jaime, V. Restrepo, S. Milena, G. Vásquez, and D. Hernán, "Universidad Militar Nueva Granada Colombia Aplicaciones de caucho reciclado: Una revisión de la literatura," *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, vol. 27, no. 2, 2017.
- [4] P. Arroyave, G. Jaime, V. Restrepo, S. Milena, G. Vásquez, and D. Hernán, "Universidad Militar Nueva Granada Colombia Aplicaciones de caucho reciclado: Una revisión de la literatura," *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, vol. 27, no. 2, 2017.
- [5] M. Walid, A. Abdelrahman, M. Kohail, and A. Moustafa, "Stress – Strain behavior of rubberized concrete under compressive and flexural stresses," *Journal of Building Engineering*, vol. 59, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.jobe.2022.105026.
- [6] N. A. Mohd Nasir, N. B. Bakar, N. A. Safiee, F. N. A. A. Aziz, and N. Archanaah, "Mechanical properties of blended-rubberized concrete," in

- Journal of Physics: Conference Series*, Institute of Physics, 2023. doi: 10.1088/1742-6596/2521/1/012016.
- [7] Y. Ji, M. G. S. Qasem, T. Xu, and A. O. Y. Mohammed, "Mechanical properties investigation on recycled rubber desert sand concrete," *Journal of CO2 Utilization*, vol. 88, Oct. 2024, doi: 10.1016/j.jcou.2024.102939.
 - [8] C. Arturo *et al.*, "METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN CUANTITATIVA Y CUALITATIVA Guía didáctica," 2011.
 - [9] R. Hernández Sampieri, C. Fernández Collado, D. M. del P. Baptista Lucio, S. Méndez Valencia, and C. P. Mendoza Torres, *Metodología de la investigación*, 6^a ed., México: McGraw-Hill, 2014.
 - [10] J. Arias-Gómez, M. Ángel Villasís-Keever, and M. Guadalupe Miranda-Novales, "mEtodología dE la invEstigación." [Online]. Available: www.nietoeditores.com.mx
 - [11] Q. Ma *et al.*, "Experimental investigation of concrete prepared with waste rubber and waste glass," *Ceram Int*, vol. 49, no. 11, pp. 16951–16970, Jun. 2023, doi: 10.1016/j.ceramint.2023.02.058.
 - [12] H. Su, J. Yang, T. C. Ling, G. S. Ghataora, and S. Dirar, "Properties of concrete prepared with waste tyre rubber particles of uniform and varying sizes," *J Clean Prod*, vol. 91, pp. 288–296, Mar. 2015, doi: 10.1016/j.jclepro.2014.12.022.
 - [13] T. S. Vadivel, A. Suseelan, K. Karthick, M. Safran, and S. Alfarhood, "Experimental Investigation and Machine Learning Prediction of Mechanical Properties of Rubberized Concrete for Sustainable Construction," *Sci Rep*, vol. 14, no. 1, p. 22725, Dec. 2024, doi: 10.1038/s41598-024-73504-7.
 - [14] J. Liu, J. Li, Y. Xu, and S. Ma, "Mechanical Properties of Cement Concrete with Waste Rubber Powder," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 14, no. 15, Aug. 2024, doi: 10.3390/app14156636.
 - [15] T. Du *et al.*, "Rubberized Concrete: Effect of the Rubber Size and Content on Static and Dynamic Behavior," *Buildings*, vol. 14, no. 6, Jun. 2024, doi: 10.3390/buildings14061541.