

ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DEL RESIDUO DE CAUCHO DE NEUMÁTICO COMO REEMPLAZO PARCIAL DEL AGREGADO FINO EN EL HORMIGÓN

ANALYSIS OF THE PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF WASTE TIRE RUBBER AS A PARTIAL REPLACEMENT OF FINE AGGREGATE IN CONCRETE

ANÁLISE DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DOS RESÍDUOS DE BORRACHA DE PNEUS COMO SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO AGREGADO FINO NO CONCRETO

Luz Adriana Fernandez-Torrez

Ingeniera Civil
Investigadora, Universidad Privada del Valle, Tiquipaya, Bolivia
<https://orcid.org/0000-0001-6445-6056>
adrirusher223@gmail.com

Joaquín Humberto Aquino-Rocha

Magister en Ingeniería Civil
Investigador, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil
<https://orcid.org/0000-0002-3383-6379>
joaquinaquinorocha@gmail.com

Nahúm Gamalier Cayo-Chileno

Ingeniero Civil
Investigador, Universidad Privada del Valle, Tiquipaya, Bolivia
<https://orcid.org/0000-0003-4350-1174>
nahum.cayo.chileno@gmail.com



RESUMEN

El objetivo del presente estudio es evaluar las propiedades físicas y mecánicas del hormigón con residuos de caucho de neumático (RCN) como sustituto parcial a la arena, considerando materiales locales de la ciudad de Cochabamba, Bolivia, a fin de promover una economía circular. Para ello, se sustituyó la arena por RCN (en volumen) en cuatro porcentajes: 0% (referencia), 5%, 10% y 20%, evaluando sus propiedades mecánicas (resistencia a la compresión, tracción y flexión) y físicas (masa específica, absorción de agua e índice de vacíos). Los resultados indican que existe una tendencia a la disminución a mayor porcentaje de RCN, tanto para la resistencia mecánica como para las propiedades físicas, a excepción de la mezcla con 5% de RCN, la cual presentó resultados comparables al hormigón con arena natural. El RCN puede ser utilizado en la elaboración local de hormigón hasta en un 5% sin comprometer sus propiedades mecánicas y físicas, y brinda además un enfoque sostenible.

Palabras clave

materiales de construcción, desarrollo sostenible, medio ambiente

ABSTRACT

The objective of this study is to evaluate the physical and mechanical properties of concrete with waste tire rubber (WTR) as a partial substitute for sand, considering local materials from the city of Cochabamba, Bolivia, to promote a circular economy. The sand was replaced by WTR (in volume) in four percentages: 0% (reference), 5%, 10%, and 20%, evaluating its mechanical properties (resistance to compression, traction, and bending) and physical properties (specific mass, water absorption, and void index). The results indicate that there is a tendency to decrease with a higher percentage of WTR, both for mechanical resistance and for physical properties, except for the mixture with 5% WTR, which had results comparable to concrete with natural sand. WTR can be used in the local production of concrete up to 5% without compromising its mechanical and physical properties, in addition to having a sustainable approach.

Keywords

construction materials, sustainable development, environment.

RESUMO

O objetivo do presente estudo é avaliar as propriedades físicas e mecânicas do concreto com resíduos de borracha de pneus (RCN) como substituto parcial da areia, considerando os materiais locais da cidade de Cochabamba, Bolívia, com o intuito de promover uma economia circular. Para este fim, a areia foi substituída por RCN (por volume) em quatro porcentagens: 0% (referência), 5%, 10% e 20%, avaliando suas propriedades mecânicas (resistência à compressão, à tração e à flexão) e propriedades físicas (massa específica, absorção de água e relação de vazios). Os resultados indicam que há uma tendência à diminuição com uma maior porcentagem de RCN tanto para a resistência mecânica quanto para as propriedades físicas, com exceção da mistura de 5% de RCN, que mostrou resultados comparáveis ao concreto com areia natural. O RCN pode ser usado na produção local de concreto até 5% sem comprometer suas propriedades mecânicas e físicas e proporciona uma abordagem sustentável.

Palavras-chave

materiais de construção, desenvolvimento sustentável, meio ambiente

INTRODUCCIÓN

El residuo de caucho proveniente de neumáticos (RCN) es uno de los desechos más importantes en el mundo. Se estima que 1000 millones de neumáticos entran en desuso cada año (Czajczyńska, Krzyżyńska, Jouhara y Spencer, 2017; Oliveira Neto *et al.*, 2019) y que para 2030 esta cifra alcanzará 1200 millones, totalizándose 5000 millones de neumáticos desechados de manera irregular (Pacheco-Torgal, Dingy y Jalali, 2012). En Bolivia se generan 3 millones de neumáticos residuales por año, de los cuales solo el 5% se recicla (Swisscontact, 2020). Y solo en los vertederos del eje metropolitano de la ciudad de Cochabamba se registran 16 mil toneladas de neumáticos (Vargas, 2017).

La disposición inadecuada de neumáticos genera impactos ambientales negativos que, incluso, atentan contra la salud humana, aumentan el riesgo de incendios accidentales y proporcionan refugio para mosquitos y roedores. En este sentido, la reducción y el reciclaje son actividades esenciales para conservar los recursos naturales y reducir la demanda de espacios en los vertederos, toda vez que, técnicamente, los RCN no se consideran degradables (Derakhshan *et al.*, 2017; Trudsø *et al.*, 2022).

Por otro lado, en la industria de la construcción existe una creciente demanda por áridos, se requieren aproximadamente 48.3 billones de agregados por año (The Freedonia Group, 2012). Respecto al agregado fino, se reporta un alto consumo a nivel mundial de arena para la elaboración de materiales a base de cemento, tales como hormigón y morteros. Sin embargo, la arena es un material escaso en varios países; situación que ha llevado a la búsqueda de materiales alternativos para ser utilizados como agregado fino (Kaish, Odimegwu, Zakaria y Abood, 2021; Kangavar, Lokuge, Manalo, Karunasena y Frigione, 2022). Entre una de estas soluciones se encuentra el RCN, ampliamente utilizado (W. Huang, X. Huang, Xing y Zhou, 2020; Ren, Mo, Wang y Ho, 2022).

Al emplear RCN como agregado fino se disminuye el consumo de agregado natural y se reutiliza un residuo, aplicándose así un enfoque sostenible (Thomas y Gupta, 2015; Marques *et al.*, 2020). No obstante, se debe considerar el porcentaje de reemplazo y el tamaño del RCN, puesto que podría afectar negativamente las propiedades físicas, mecánicas y de durabilidad de los materiales a base de cemento (Bisht y Ramana, 2017). En estado fresco, el uso de RCN tiene un efecto adverso en la trabajabilidad del hormigón, lo que se asocia a la cantidad y tamaño del RCN (Gravina y Xie, 2022), como también a la fricción entre partículas (superficie rugosa del RCN) y a la naturaleza no polar del RCN (Rashid, Yazdanbakhsh y Rehman, 2019).

En cuanto a las propiedades mecánicas, estudios anteriores han demostrado que, en general, la resistencia mecánica del hormigón disminuye con RCN como reemplazo al agregado fino (Aslani, Ma, Wan y Muselin, 2018). Pero esta reducción es variable, por ejemplo, Gurunandan, Phalgun, Raghavendra y Udayashankar (2019) señalaron una disminución de la resistencia a la compresión de 66.93% para 22.5% de RCN, y Silva, Mouta, Costa y Gomes (2019) indicaron una reducción de solo 17.27% con 9% de RCN. La resistencia a la tracción también presenta la misma tendencia: Yousf, Mills y Hassanli (2016) demostraron que 50% de RCN provoca una reducción de 58.5% y Abd-Elaal *et al.* (2019) reportaron una disminución de 61.22% para 40% de RCN. En términos de la resistencia a la flexión, tiende a darse una reducción de ella con el aumento de RCN (Abdelmonem, El-Feky, Nasr y Kohail, 2019; Alwesabi, Bakar, Alshaikh y Akil, 2020), sin embargo, se ha indicado asimismo un aumento en la capacidad de deformación, ya que el bajo módulo de elasticidad del RCN mejora la tenacidad del hormigón, beneficiando a la ductilidad (Hilal, 2017).

La durabilidad del hormigón con RCN igualmente ha sido reportada en la literatura especializada. Bisht y Ramana (2017) demostraron que la incorporación de RCN aumenta la penetración de agua, una vez que las microfisuras producidas por el RCN benefician el transporte del agua en el hormigón. Gurunandan *et al.* (2019) señalan que, a mayores porcentajes de RCN, la profundidad de penetración de iones cloruro aumenta, lo que se atribuye a la formación de una Zona de Transición Interfacial (ZTI) débil entre el RCN y la matriz de cemento. De otra parte, la resistencia al hielo-deshielo presenta un mejor rendimiento, principalmente a bajas cantidades de RCN, lo que se debe a la naturaleza hidrófoba del RCN y a su capacidad de absorción de energía (W. Zhang, Gong y J. Zhang 2018; Pham, Toumi y Turatsinze, 2019).

Si bien se han realizado investigaciones significativas en el área, el RCN no es adoptado en la industria de la construcción, pese a que atiende a diferentes requerimientos, incluso a elementos estructurales (Huang *et al.*, 2020; Ren *et al.*, 2022). En Bolivia no se reportan estudios de la utilización de RCN como agregado fino en materiales a base de cemento, como el hormigón, lo que representaría una solución a problemas locales, como la sobreexplotación de los bancos de agregados y la elevada generación de RCN, con base en una economía circular (Symeonides, Loizia y Zorpas, 2019; Ross, 2020). Desde esta perspectiva, el objetivo del siguiente trabajo es evaluar las propiedades físicas y mecánicas del hormigón con RCN como reemplazo a la arena (0, 5, 10 y 20% en volumen), utilizando materiales y residuos locales de la ciudad de Cochabamba, a fin de verificar su viabilidad técnica para producir hormigón.

Parámetro	Unidad	Cemento IP-40	NB – 011/RM - 261
Pérdida por ignición	%	2.1	≤5.00
SiO ₂	%	25.82	-
Al ₂ O ₃	%	5.05	-
Fe ₂ O ₃	%	2.61	-
CaO	%	58.81	-
MgO	%	5.57	≤6.00
SO ₃	%	2.54	≤4.00
Na ₂ O	%	0.22	-
K ₂ O	%	0.87	-
RI	%	7.55	≤35.00

Tabla 1. Composición química del cemento IP-40. Fuente: Proporcionado por el fabricante (Coboce R. L.)

Parámetro	Unidad	Cemento IP-40	NB – 011/RM - 261
Blaine	cm ² /g	5153	≥2800
Retenido T325	%	2.66	-
Densidad real	cm ³ /g	3.03	-
Densidad aparente	cm ³ /g	1.04	-
Inicio fraguado	h	2.09	≥0.75
Final fraguado	h	4.17	≤7.00
Exp. Le Chatelier	mm	0.93	≤ 8.00
Resistencia 3 días	MPa	30.09	≥17.00
Resistencia 7 días	MPa	36.79	≥25.00
Resistencia 28 días	MPa	41.65	≥40.00

Tabla 2. Características físicas del cemento IP-40. Fuente: Proporcionado por Coboce R. L.

METODOLOGÍA

MATERIALES

Para la elaboración del concreto se utilizaron los siguientes materiales, todo provenientes de la ciudad de Cochabamba (Bolivia): cemento puzolánico IP-40, comercializado en; arena y grava natural, provenientes del banco Parotani; agua potable de la Universidad Privada del Valle; y RCN obtenido de una empresa de reciclaje local (TERRACYCLE).

La composición química y las características físicas del cemento IP-40 se presentan en la Tabla 1 y 2, respectivamente.

Se realizó el ensayo de granulometría del agregado grueso (Figura 1) y fino (Figura 2) siguiendo la normativa ASTM

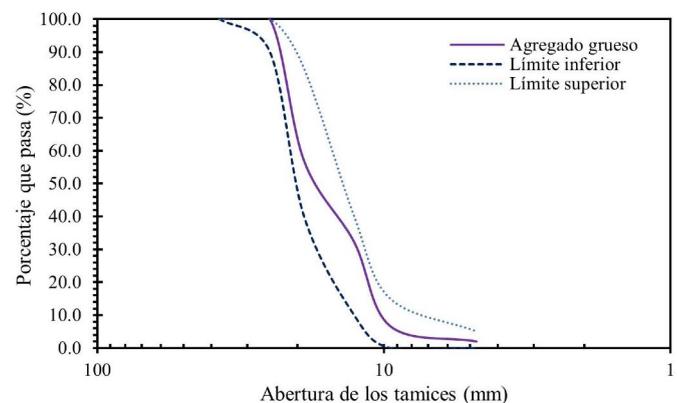


Figura 1. Granulometría del agregado grueso. Fuente: Elaboración de los autores.

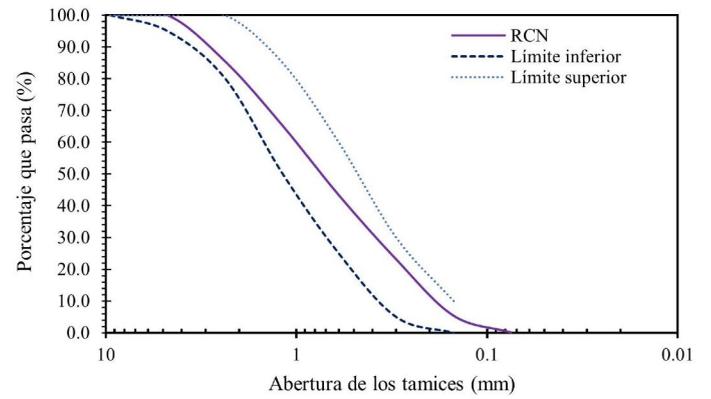
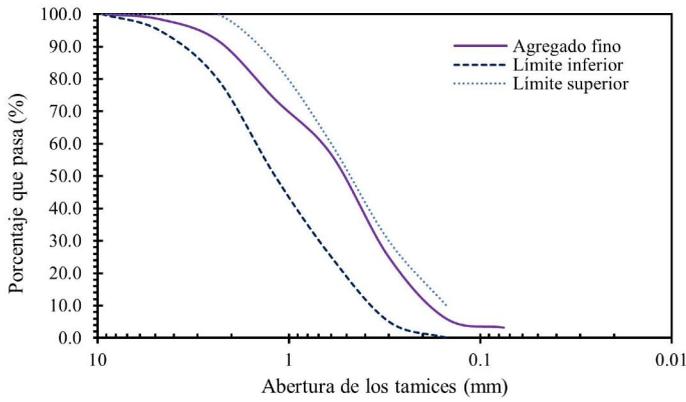
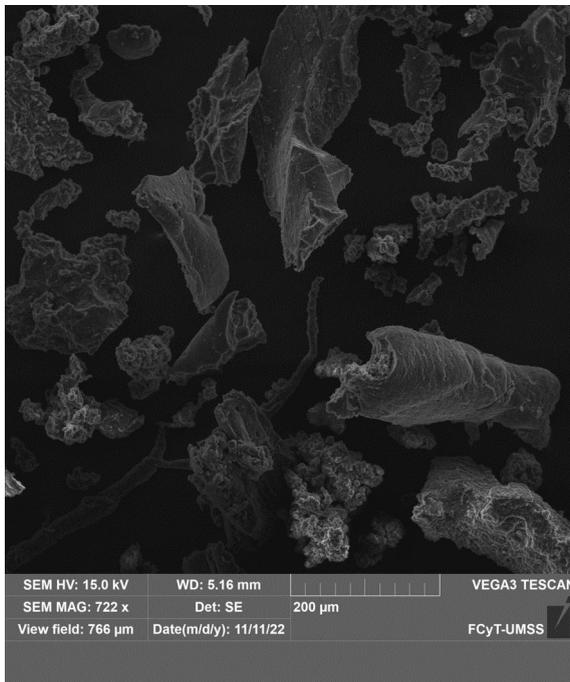
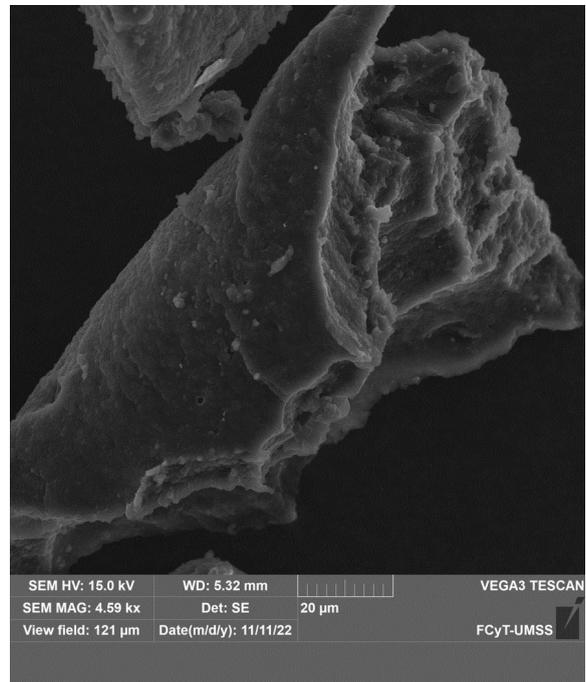


Figura 2. Granulometría del agregado fino. Fuente: Elaboración de los autores.
 Figura 3. Granulometría del RCN. Fuente: Elaboración de los autores.



a)



b)

Figura 4. a) Forma de las partículas de RCN. b) Superficie de las partículas de RCN. Fuente: Elaboración de los autores.

C136 (ASTM, 2020). El módulo de finura del agregado grueso y fino fue de 7.34 y 2.36, respectivamente, con un tamaño máximo de agregado de 19 mm. La densidad relativa del agregado grueso fue de 2.63 g/cm³, valor determinado por la norma ASTM C127 (ASTM, 2015a). Mientras que el agregado fino tiene una densidad relativa de 2.77 g/cm³ siguiendo la ASTM C128 (ASTM, 2015b).

El RCN proviene del proceso de reciclaje de neumáticos desechados y recolectados en la ciudad de Cochabamba, Bolivia. El RCN presenta una densidad de 1.1 g/cm³ a 25 °C. En la Figura 3 se grafica la curva granulométrica del RCN, tomando en cuenta la norma ASTM C136 (ASTM, 2020).

El RCN se presenta en gránulos de forma irregular (Figura 4a) y superficie rugosa (Figura 4b), características similares del RCN reportado en la literatura (Bisht y Tamana, 2017; Gurunandan et al., 2018; Abd-Elaal et al., 2019; Letelier, Bustamante, Muñoz, Rivas y Ortega, 2021).

La Figura 5 presenta la composición química elemental del RCN (en porcentaje de peso): Carbono (93.1%), Oxígeno (3.6%), Zinc (1.7%), Azufre (1.3%), Fósforo (0.2%) y Potasio (0.1%). La composición química elemental es similar a la señalada por otros autores que utilizaron RCN como agregado fino (Bisht y Tamana, 2017; Ren et al., 2022).



Figura 5. Análisis de energía dispersiva por Rayos X del RCN. Fuente: Elaboración de los autores.

Mezclas (RCN)	Agua (kg)	Cemento (kg)	Agregado grueso (kg)	Agregado fino (kg)	RCN (kg)
Ref. (0%)	143.64	272.29	1156.91	868.23	0.00
5%	143.64	272.29	1156.91	824.82	17.24
10%	143.64	272.29	1156.91	781.41	34.48
20%	143.64	272.29	1156.91	694.58	67.35

Tabla 3. Cantidad de materiales por 1 m³ de hormigón. Fuente: Elaboración de los autores.

DEFINICIÓN DE MEZCLAS

En este punto, se consideró una resistencia a la compresión de diseño de 21 MPa, dentro del rango establecido para un hormigón estructural (IBNORCA, 1987). Se evaluó el reemplazo de la arena por RCN (volumen) en cuatro mezclas: 0% (referencia), 5%, 10% y 20%. La Tabla 3 exhibe la cantidad de materiales por mezcla para 1 m³.

ENSAYOS FÍSICOS Y MECÁNICOS

El ensayo de asentamiento se realizó siguiendo la norma UNE-EN 12350-2 (Asociación Española de Normalización, 2020), utilizando el cono de Abrams y verificando la consistencia plástica (3-5±1cm) de la referencia (0% RCN). Se determinó la resistencia a la compresión, tracción y flexión del hormigón con RCN para 7 y 28 días. La resistencia a la compresión fue determinada siguiendo las especificaciones de la CBH 87 (IBNORCA, 1987). La resistencia a la tracción fue calculada mediante el ensayo brasileño, NBR 7222 (ABNT, 2011). Para ambas propiedades se utilizaron cuerpos de prueba cilíndricos de 10x20 cm. A fin de determinar la resistencia a la flexión se usaron cuerpos de pruebas prismáticos de 15x15x55 cm, considerando el método estándar de tres puntos, según la ASTM C293 (ASTM, 2016). Cuatro cuerpos de prueba fueron ensayados para cada mezcla estudiada y propiedad mecánica.

A partir de los fragmentos generados en los ensayos mecánicos se llevó a cabo el ensayo de Microscopía Electrónica de Barrido (MEB), de manera de observar la interacción del RCN con la matriz de cemento. Antes del ensayo se generó un vacío en los fragmentos de hormigón y se recubrieron con una capa de oro para una mejor visualización de la microestructura. El equipo utilizado fue de la marca OXFORD INSTRUMENTS.

La absorción de agua, masa específica (densidad) e índice de vacíos fueron determinados siguiendo la norma ASTM C642 (ASTM, 2021). Se consideraron 3 cuerpos de prueba cilíndricos (10 x 20 cm) por cada mezcla y propiedad física. La edad de ensayo fue de 28 días, según recomienda la ASTM C642 (ASTM, 2021).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

ASENTAMIENTO

A medida que aumenta el contenido de RCN, el asentamiento del hormigón disminuye (Figura 6). El rango de reducción está entre 37.58 y 91.93% para 5 y 20% de RCN, respectivamente. Rashid et al. (2019) también reportaron reducciones de la trabajabilidad similares, 64% para 10% de RCN y 76.9%, tanto para 20 como 30% de RCN. Eisa, Elshazli y Nawar. (2020) indican una reducción del 2 al 28% para 5 y 20% de RCN, respectivamente. La pérdida de trabajabilidad se explica por la forma irregular de las partículas de RCN (Figura 4a),

la distribución de granulometría más baja que la arena (<3.5 mm) y la superficie rugosa del RCN (Figura 4b), lo cual genera fricción entre las partículas (Gurunandan *et al.*, 2019; Rashid *et al.*, 2019; Eisa *et al.*, 2020; Karunarathna, Linforth, Kashani, Liu y Ngo, 2021). En este sentido, Abdelmonem *et al.* (2019) señalan que el uso de superplastificantes disminuye el efecto negativo del RCN sobre la trabajabilidad del hormigón, obteniéndose una reducción máxima de 8.5% para 30% de RCN.

Concretamente, aquí se realizó un análisis de varianza (ANOVA) y la prueba Tukey, a fin de comprobar si la disminución de las medias del asentamiento era significativa, considerando un α de 0.05. En el primer caso (ANOVA), se concluyó que existe diferencias significativas entre las medias, el p valor fue 1.94E-9 ($<\alpha$). Mediante la prueba Tukey (Tabla 4) se puede afirmar que existen diferencias significativas entre todas las medidas del asentamiento, y que, a mayor porcentaje de RCN, menor trabajabilidad tiene el hormigón.

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

En la Figura 7 se muestran los resultados de la resistencia a la compresión para 7 y 28 días. Se puede observar que, para ambas edades, existe una reducción de la resistencia a la compresión a medida que aumenta el reemplazo del agregado fino por RCN, donde solo la mezcla de referencia alcanzó la resistencia a la compresión de diseño (21.51 MPa). La reducción en la resistencia a la compresión del hormigón se debe principalmente a la naturaleza hidrofóbica del RCN, lo que se traduce en una débil zona de transición interfacial (ZTI); el RCN también induce a altas concentraciones de tensión, produciendo una propagación de grietas, y a la baja gravedad específica del RCN que genera una distribución no uniforme de los esfuerzos (Ren *et al.*, 2022; Li, Zhang, Wang y Lei, 2019). Por otro lado, Najim y Hall (2013) y Wu, Kazmi, Munir, Zhou y Xing (2020) han señalado que la gran diferencia del módulo de elasticidad del RCN y la matriz de cemento desarrolla una deficiente unión con la matriz de cemento, generando una menor compacidad en la microestructura y, por lo tanto, una disminución de las propiedades mecánicas (compresión, tracción y flexión).

La Figura 8 presenta la variación porcentual de la resistencia a la compresión con relación a la referencia. Para 7 días, existe una reducción mínima (1.58%) en la mezcla 5% de RCN; sin embargo, para 10 y 20% de RCN la reducción es significativamente mayor, 15.22 y 21.99%, respectivamente. En el caso de los 28 días, se registra una reducción mayor que a los 7 días para 5% de RCN (6.41%), pero para 10 y 20% de RCN los porcentajes de disminución son menores, 8.89 y 14.23%, respectivamente. En ambos casos se advierte una tendencia a la reducción de la resistencia a la compresión, la cual se realza a mayores porcentajes de RCN, situación reportada previamente (Karunarathna *et al.*, 2021; Hilal,

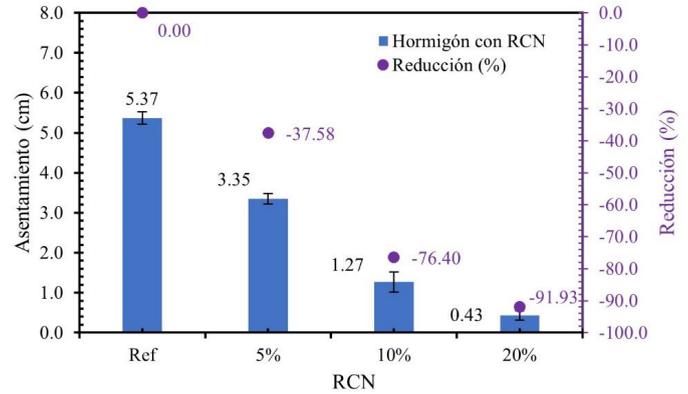


Figura 6. Asentamiento del hormigón con RCN. Fuente: Elaboración de los autores.

Mezclas (RCN)		p valor
Grupo 1	Grupo 2	
Ref. (0%)	5%	2.5E-06
Ref. (0%)	10%	1.2E-08
Ref. (0%)	20%	4.2E-09
5%	10%	1.9E-06
5%	20%	1.1E-07
10%	20%	0.00153

Tabla 4. Prueba Tukey para asentamiento del hormigón con RCN. Fuente: Elaboración de los autores.

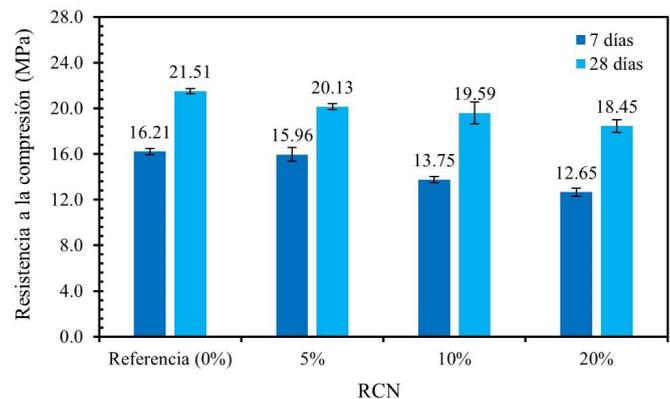


Figura 7. Resistencia a la compresión del hormigón con RCN. Fuente: Elaboración de los autores.

2017, Ren *et al.*, 2022). Su, Yang, Ling, Ghataora y Dirar (2015) informaron, de igual forma, una reducción en el rango de 9.5-10.6% para un 20% de RCN. Alwesabi *et al.* (2020) indicaron una disminución de 38.9% para 20% de RCN y Gesoğlu, Güneyisi, Khoshnaw e İpek (2014) reportaron reducciones de 7.9 y 38.6% para 10 y 20% de reemplazo de arena por RCN, respectivamente, atribuyendo este comportamiento a la unión del RCN y

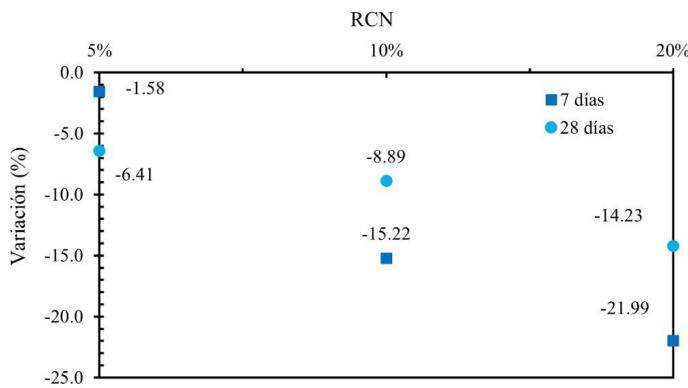


Figura 8. Variación porcentual de la resistencia a la compresión para hormigón con RCN. Fuente: Elaboración de los autores.

la pasta de cemento. Por otro lado, Letelier et al. (2021) evidencian mayores porcentajes de reducción para 10 y 15% de RCN, 37.2 y 51.1%, respectivamente.

Para verificar si la reducción de las medias de la resistencia a la compresión es significativa, se realizó un análisis de varianza (ANOVA) y la prueba Tukey, ambas para un α de 0.05. El p valor de ANOVA fue 5.52E-08 y 8.16E-05 para 7 y 28 días, respectivamente, resultando diferencias significativas entre las medias ($p \text{ valor} < \alpha$).

En la prueba Tukey para 7 días (Tabla 5), se observa que no existe diferencia entre la referencia y la mezcla con 5% de RCN, lo cual corresponde al bajo porcentaje de reducción (1.58%); no obstante, también las mezclas de 10 y 20% de RCN son iguales. En caso de 28 días (Tabla 5), existe diferencia entre las medias de la referencia y las mezclas con RCN ($p \text{ valor} < \alpha$), pero entre los distintos porcentajes de RCN no existe diferencia, a excepción de 5 y 20% de RCN. Estos resultados indican que el RCN influye en la resistencia a la compresión de forma negativa; sin embargo, a elevados porcentajes de RCN (10 y 20%), la reducción es estadísticamente igual.

RESISTENCIA A LA TRACCIÓN

La resistencia a la tracción para 7 y 28 días de todas las mezclas se grafica en la Figura 9. A la edad de 7 días, se aprecia una reducción de ella con el aumento de RCN -siendo el valor más alto en la referencia-, pero solo una diferencia mínima respecto a la mezcla de 5% de RCN. Para 28 días, también existe una diferencia mínima entre la mezcla de 5% de RCN y la referencia. Otros porcentajes de RCN manifiestan una reducción mayor.

La reducción porcentual de las mezclas con RCN respecto a la referencia se presenta en la Figura 10. Para 7 días existe mayor disminución cuando se compara con la edad de 28 días. En ambas edades, la reducción es baja para la mezcla de 5% de RCN; mientras que se registran disminuciones de 14.29 y 15.53% para 10 y 20% de RCN a

Mezclas (RCN)		p valor	
Grupo 1	Grupo 2	7 días	28 días
Ref. (0%)	5%	0.80771	0.02728
Ref. (0%)	10%	8.9E-06	0.00295
Ref. (0%)	20%	1.7E-07	4.5E-05
5%	10%	2.7E-05	0.58977
5%	20%	3.8E-07	0.00764
10%	20%	0.01089	0.07131

Tabla 5. Prueba Tukey para resistencia a la compresión a 7 y 28 días. Fuente: Elaboración de los autores.

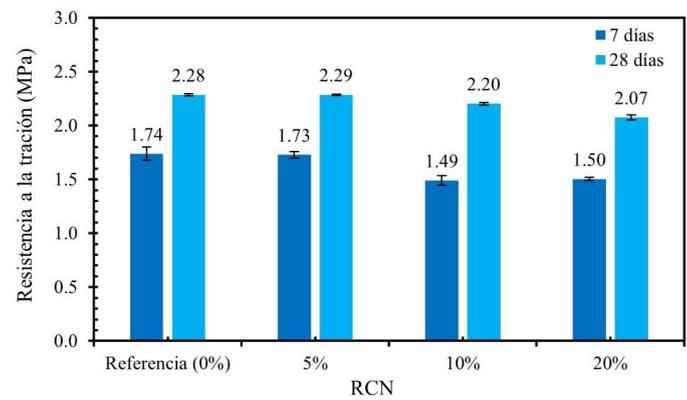


Figura 9. Resistencia a la tracción del hormigón con RCN. Fuente: Elaboración de los autores.

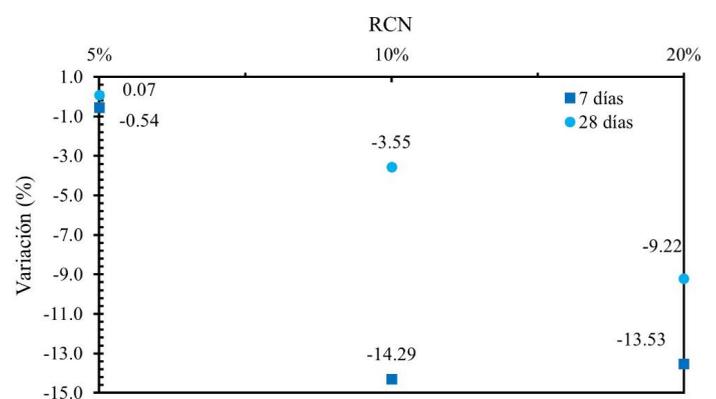


Figura 10. Variación porcentual de la resistencia a la tracción para hormigón con RCN. Fuente: Elaboración de los autores

los 7 días, respectivamente. A los 28 días, la reducción fue de 3.55% para 10% de RCN y de 9.22% para 20% de RCN. Estos resultados concuerdan con otros trabajos, como el de Su et al. (2015), quienes reportaron una disminución de 8.77% para 20% de RCN, y el de Elchalakani (2015), quien expuso rangos similares de reducción.

Mezclas (RCN)		p valor	
Grupo 1	Grupo 2	7 días	28 días
Ref. (0%)	5%	0.98837	0.99874
Ref. (0%)	10%	1.2E-05	2.6E-05
Ref. (0%)	20%	2E-05	6.8E-10
5%	10%	1.7E-05	2.2E-05
5%	20%	3.1E-05	6.3E-10
10%	20%	0.96844	1.8E-07

Tabla 6. Prueba Tukey para resistencia a la tracción a 7 y 28 días.
 Fuente: Elaboración de los autores

Mediante ANOVA se afirma que existe diferencia entre las medias, el p valor obtenido fue menor a 0.05, 1.06E-06 y 2.82E-10 para 7 y 28 días, respectivamente. En la prueba Tukey (Tabla 6), tanto para 7 como 28 días, no se advierte diferencia entre la referencia y 5% de RCN ($p > \alpha$), lo que se puede verificar en la Figura 6. Adicionalmente, se observa que, para 7 días, no existe diferencia entre 10 y 20% de RCN. Estos resultados indican que se da una tendencia de disminución al usar RCN, pero, hasta un 5% de RCN, no se produce un impacto significativo en la resistencia a la tracción. En congruencia con esto, Hilal (2017) sugiere que la incorporación de RCN no afectaría la resistencia a la tracción en el hormigón si la granulometría del RCN es continua, como es el caso de la presente investigación (Figura 3), toda vez que las partículas pequeñas de RCN podrían tener un efecto de relleno, mejorando la compacidad en la microestructura y reduciendo la tensión en el interior de los poros.

Por otra parte, la disminución de la resistencia mecánica se relaciona con el tamaño de partícula de RCN, especialmente cuando es mayor a 5 mm (A. Kadhim y H. Kadhim, 2021). En este marco, el bajo impacto del 5% de RCN en la resistencia a la tracción también se puede explicar por el tamaño de partícula utilizado, considerando que el máximo fue de 3.5 mm (Figura 3).

RESISTENCIA A LA FLEXIÓN

Los resultados de resistencia a la flexión para 7 y 28 días se ilustran en la Figura 11. De modo similar a las anteriores propiedades analizadas, existe acá una reducción con la sustitución de arena por RCN, siguiendo la tendencia publicada (Thomas y Gupta, 2015; Gurunandan et al., 2019; Ren et al., 2022). Ahora bien, no parece existir una clara diferencia entre las mezclas de 5 y 10% de RCN, puesto que los valores son similares e, incluso, se genera una mejora mínima para 10% de RCN. Alwesabi et al. (2020) atribuyen la reducción de la resistencia a la flexión a la débil unión entre el mortero y el caucho, situación que aumenta la concentración de tensión y acelera la propagación de grietas.

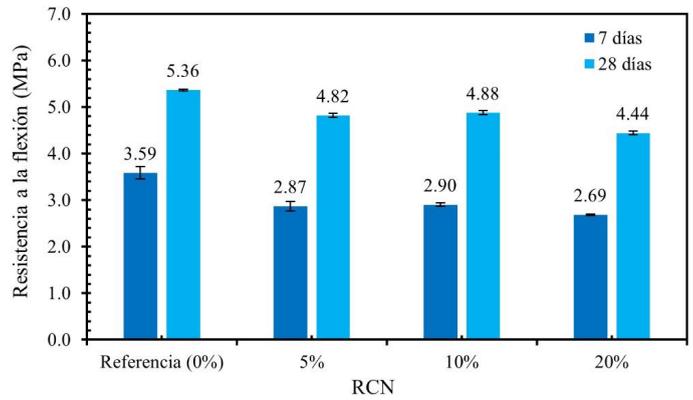


Figura 11. Resistencia a la flexión del hormigón con RCN.
 Fuente: Elaboración de los autores.

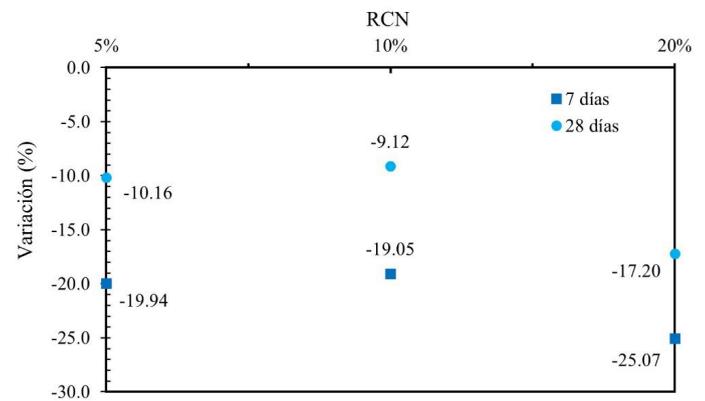


Figura 12. Variación porcentual de la resistencia a la flexión para hormigón con RCN. Fuente: Elaboración de los autores.

Mezclas (RCN)		p valor	
Grupo 1	Grupo 2	7 días	28 días
Ref. (0%)	5%	3.1E-07	7E-10
Ref. (0%)	10%	5.1E-07	2.4E-09
Ref. (0%)	20%	2.3E-08	7.1E-13
5%	10%	0.9507	0.21994
5%	20%	0.04466	4.8E-08
10%	20%	0.01776	9.9E-09

Tabla 7. Prueba Tukey para resistencia a la flexión a 7 y 28 días.
 Fuente: Elaboración de los autores.

En la Figura 12 se muestra la reducción con respecto a la referencia. Los valores a 7 días presentan mayor disminución que a 28 días, siendo el máximo de 25.07% para 20% de RCN. A los 28 días, el porcentaje de disminución para 5 y 10% de RCN está en el rango de 10%, a diferencia de 20% de RCN, cuyo valor es 17.20%. Resultados similares fueron encontrados por Hilal (2017): reducción de hasta 40% con 25% de RCN; y Abdelmonem

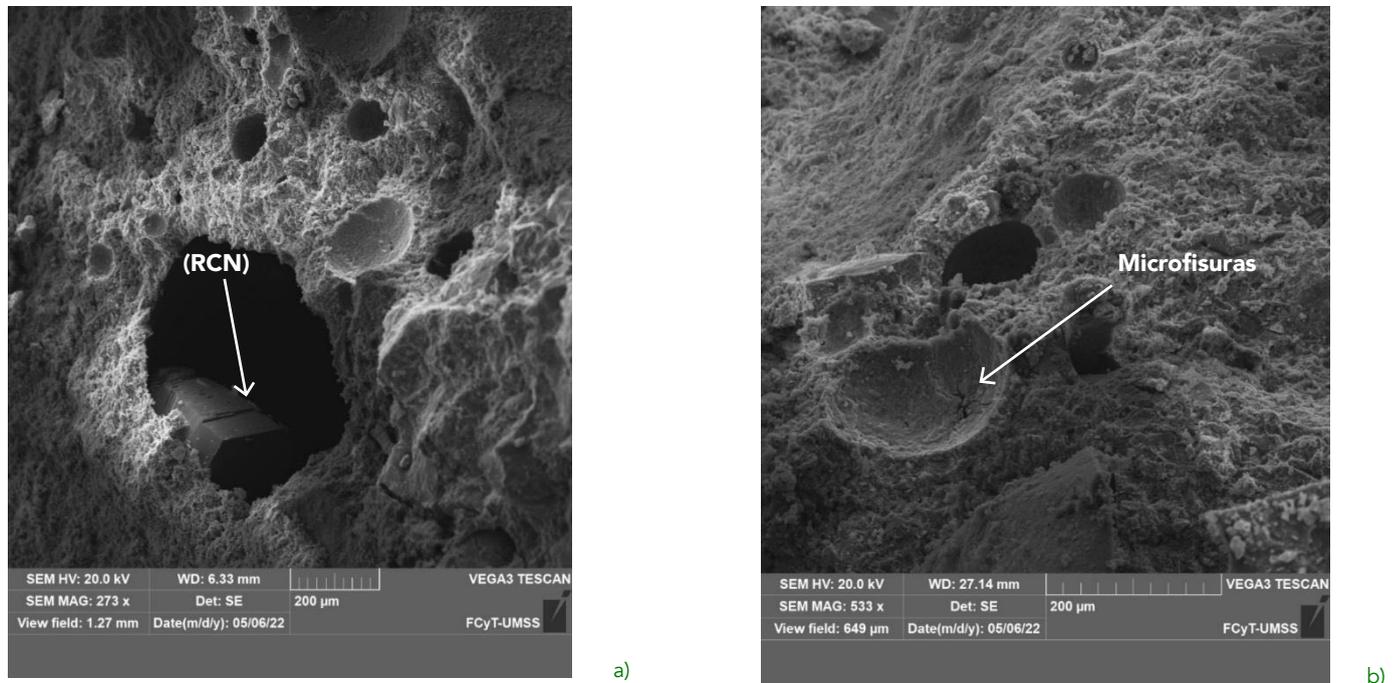


Figura 13. Microestructura del hormigón con RCN. Fuente: Elaboración de los autores.

et al. (2019): disminución de 27.6% para 30% de RCN. Si bien los presentes resultados están de acuerdo con la literatura, otros pocos estudios han demostrado una tendencia contraria: mayor resistencia a la flexión con la adición de RCN (Yousf et al., 2016) y, RCN con fibras de polipropileno (Shahjalal et al., 2021).

Mediante ANOVA se puede establecer que existen diferencias significativas entre las medias de la resistencia a la flexión, puesto que el p valor ($<\alpha$) resultó de 2.39E-08 y de 3.19E-12 para 7 y 28 días, respectivamente. La Tabla 7 resume lo obtenido a partir de la prueba Tukey, donde se observa que las mezclas de 5 y 10% de RCN no presentan diferencias significativas (p valor $>\alpha$), como se comentó antes (Figura 8). Por consiguiente, a medida que se aumente el reemplazo de arena por RCN se producirá una reducción en la resistencia a la flexión. No obstante, este comportamiento es más significativo en porcentajes elevados (20%); en porcentajes menores (5 y 10%) se genera una reducción similar.

MICROESTRUCTURA

La Figura 13 ilustra la microestructura del concreto con RCN. En la Figura 13a se puede observar la interacción del RCN con la matriz de cemento, que muestra adherencia entre los productos de hidratación y RCN, pero también se advierte la presencia de porosidad. En la Figura 13b se evidencia la propagación de microfisuras en el concreto con RCN, situación descrita por Alwesabi et al. (2020). Estos factores influyen en la resistencia mecánica del concreto, como fue analizado en la sección anterior.

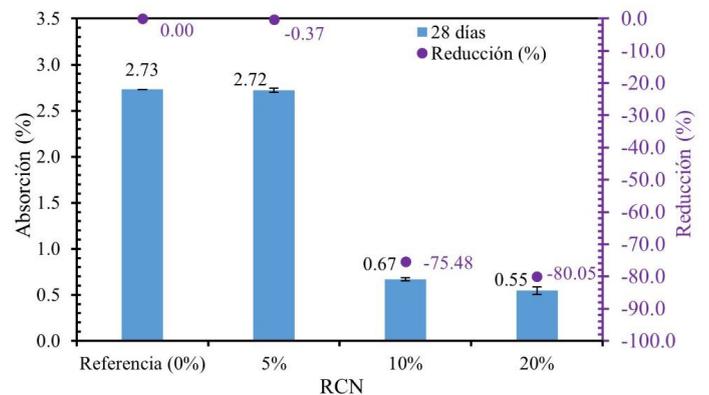


Figura 14. Absorción de las mezclas con RCN a los 28 días. Fuente: Elaboración de los autores.

La reducción de las propiedades mecánicas se puede explicar igualmente por la forma irregular y textura suave de las partículas de RCN (Figura 4), dado que esta condición conduce a una propagación de microfisuras, lo que prueba una débil ZTI (Bisht y Ramana, 2017).

ABSORCIÓN, DENSIDAD E ÍNDICE DE VACÍOS

Los resultados referentes a las propiedades físicas de absorción, densidad e índice de vacíos se aprecian en las Figuras 14, 15 y 16, respectivamente. Mediante ANOVA se puede verificar que existen diferencias significativas entre las medias por propiedad. El p valor ($<\alpha$) fue de 2.24E-19, 1.14E-04 y 7.38E-07 para la absorción, densidad e índice de vacíos, respectivamente. En la Tabla 8 se indican los resultados

de la prueba Tukey para comparar las diferencias entre los grupos estudiados.

Respecto a la absorción (Figura 14), se puede percibir que existe una disminución a medida que aumenta el porcentaje de RCN. Sin embargo, no se evidencia diferencia entre 5% de RCN y la referencia (Tabla 8). Para 10 y 20% de RCN la reducción fue mayor, 75.48 y 80.05%, respectivamente. Los resultados indican que cantidades mayores al 5% de RCN disminuyen de manera considerable la absorción (por encima del 70%). Dichos porcentajes están de acuerdo con la literatura revisada: Thomas y Gupta (2015) y Saloni, Parveen, Pham, Lim y Malekzadeh (2021) señalan que existe una tendencia decreciente de la absorción con la incorporación de RCN, lo que se debe a la naturaleza impermeable del caucho. Por el contrario, la sustitución de arena por RCN de un solo tamaño provocaría el aumento de la porosidad (mayor absorción de agua), pero un RCN de granulometría continua podría mejorar la capacidad de relleno y derivar en una reducción de la absorción de agua (Ren et al., 2022). En este sentido, tanto la naturaleza impermeable como la granulometría continua del RCN disminuyen la absorción de agua de las mezclas con RCN, especialmente para contenidos mayores al 5%.

Al igual que en los estudios de Moustafa y ElGawady (2015), Silva et al. (2019) y Alwesabi et al. (2020), la densidad se reduce con el aumento del porcentaje de RCN (Figura 15), debido a la baja densidad del RCN (1.1 g/cm³), además de que la textura irregular del RCN permite atrapar aire (Taha, El-Dieb, Abd El-Wahab y Abdel-Hameed, 2008). Para 5% de RCN se expresa una diferencia mínima de -1.83% respecto a la referencia, valor no significativo: p valor>0.05 (Tabla 8). Otros dos grupos tampoco presentan diferencias: 5 con 10% de RCN, y 10 con 20% de RCN. Se puede establecer, entonces, que cantidades menores al 5% de RCN no influyen significativamente en la densidad del hormigón, y que mayores porcentajes generan una mayor reducción, a pesar de no existir una clara diferencia entre algunos grupos. Abdelmonem et al. (2019) reportaron esta misma tendencia negativa en la densidad debida al bajo peso unitario del RCN. Asimismo, Moustafa y ElGawady (2015) evidenciaron reducciones similares para 5, 10 y 20% de RCN, 1.91, 2.87 y 5.09%, respectivamente.

El índice de vacíos disminuye a medida que aumenta la sustitución de arena por RCN (Figura 16). Hasta un 5% de RCN no presenta diferencia significativa con la referencia (Tabla 8), reducción de 1.16%, pero para un 20% de RCN la reducción es 29.83%. Este comportamiento puede ser explicado por la mejora de la compacidad de las mezclas (reducción de la porosidad), resultado de la granulometría continua del RCN. Ya el uso de RCN de un solo tamaño aumenta la absorción de agua y el contenido de vacíos (Eisa et al., 2020). Los resultados concuerdan con Silva et al. (2019), quienes también indicaron una reducción de índice de vacíos con 9% de RCN. Si bien

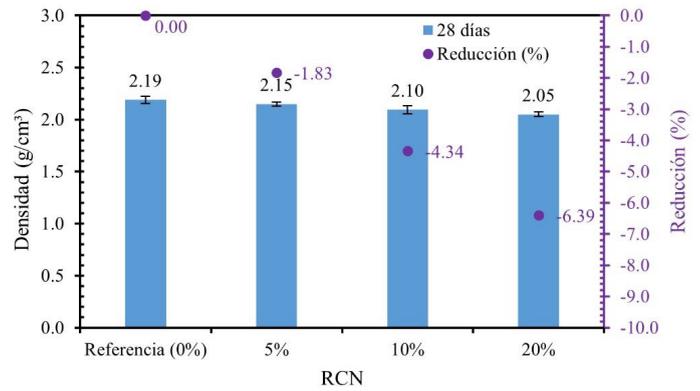


Figura 15: Densidad de las mezclas con RCN a los 28 días. Fuente: Elaboración de los autores.

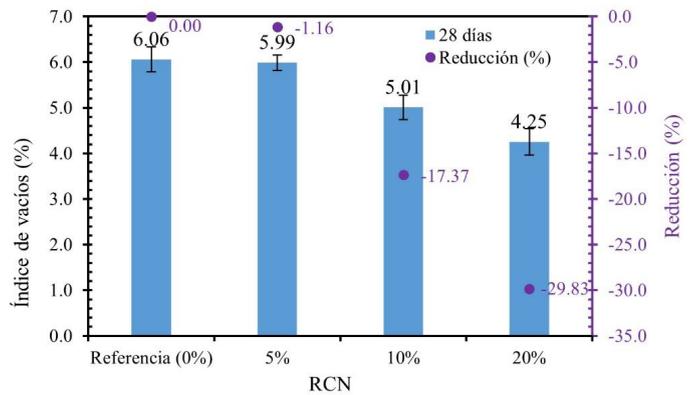


Figura 16: Índice de vacíos de las mezclas con RCN a los 28 días. Fuente: Elaboración de los autores.

Mezclas (RCN)		p valor		
Grupo 1	Grupo 2	Absorción	Densidad	Vacíos
Ref. (0%)	5%	0.96788	0.1915	0.97905
Ref. (0%)	10%	7.4E-15	0.00323	0.00039
Ref. (0%)	20%	7.4E-15	9.4E-05	1.8E-06
5%	10%	7.4E-15	0.1314	0.00072
5%	20%	7.4E-15	0.00264	2.7E-06
10%	20%	0.00045	0.15902	0.00586

Tabla 8. Prueba Tukey para las propiedades físicas. Fuente: Elaboración de los autores.

los resultados son positivos en términos de absorción de agua y contenido de vacíos, propiedades que afectan la resistencia mecánica y durabilidad, se requieren más estudios sobre el comportamiento físico-mecánico a largo plazo, a fin de comprobar las tendencias y compararlas con otras investigaciones (Ren et al., 2022).

Conforme lo mencionado, el reemplazo parcial de la

arena por RCN tiene un impacto positivo sobre el medio ambiente, ya que evita la extracción de materias primas y reduce el descarte de residuos (Rashid *et al.*, 2019), y, según los resultados presentados, el desempeño físico-mecánico es similar al hormigón convencional (RCN 5%). Desde este enfoque, es necesario impulsar un plan de acción para una economía circular en el uso de residuos locales, como es el caso del RCN, introduciendo nuevas materias primas en la economía (Ross, 2020; Trudsø *et al.*, 2022).

Pese a que el uso del RCN no está normado para su incorporación en el hormigón, existen algunas iniciativas al respecto, desde especificaciones técnicas (CEN, 2010) hasta literatura científica para su uso como materia prima secundaria (Oliveira Neto *et al.*, 2019; Alwesabi *et al.*, 2020; Ren *et al.*, 2022). Finalmente, aunque el comportamiento físico-mecánico del hormigón es importante para su aplicación, es fundamental evaluar sus impactos ambientales, principalmente cuando algunos de sus componentes se sustituyen por residuos. Por lo tanto, se recomienda el uso de herramientas y/o metodologías complementarias que permitan evaluar el desempeño ambiental del hormigón con RCN dentro de un contexto sostenible, a lo largo de su ciclo de vida, como el caso de la metodología Evaluación de Ciclo de Vida (ECV) (Gravina y Xie, 2022; Hossein, Azarijafari y Khoshnazar, 2022).

CONCLUSIONES

En el presente estudio se evaluó el comportamiento de las propiedades físicas y mecánicas del hormigón con RCN. Los resultados obtenidos señalan que el reemplazo de arena por RCN tiene un impacto negativo sobre la trabajabilidad y propiedades mecánicas. En el primer caso, la forma irregular y superficie rugosa de las partículas de RCN generan fricción, reduciendo la trabajabilidad de las mezclas con RCN. La pérdida de la trabajabilidad está en el rango de 37.58 y 91.93% para 5 y 20% de RCN, respectivamente, de modo que es más significativa a mayores porcentajes de RCN. Con relación a las propiedades mecánicas, se observa que la resistencia a la compresión, tracción y flexión disminuyen con el aumento de RCN; no obstante, 5% de RCN presentó las menores diferencias con respecto a la referencia: -6.41, 0.07 y -10.16% para la resistencia a la compresión, tracción y flexión, respectivamente. Se resalta que, para 5% de RCN no existe diferencia significativa con la mezcla referencia. La reducción de las propiedades mecánicas se debe a la formación de una débil ZTI entre el RCN y la matriz de cemento, lo que se relaciona tanto con la naturaleza hidrófuga como con el bajo módulo de elasticidad del RCN.

La absorción, densidad e índice vacíos presentaron una mejora debido al RCN: la absorción disminuyó con porcentajes elevados de RCN (10 y 20%), valores por

encima del 75%. El hormigón exhibió menor densidad, presentado reducciones de 1.83 a 6.39% para 5 y 20% de RCN, respectivamente, y el índice de vacíos mostró una tendencia a la disminución. Si bien para 5% de RCN la reducción no fue estadísticamente significativa, para 20% de RCN esta alcanzó un 29.83%. Este impacto positivo en las propiedades físicas se debe a la granulometría continua y la impermeabilidad de las partículas de RCN.

El hormigón con bajo contenido de RCN (hasta 5%) constituye una alternativa técnicamente viable en la industria de la construcción, toda vez que presenta el mismo rendimiento físico-mecánico que un hormigón convencional. Adicionalmente, el uso RCN tiene un impacto sostenible local, en la medida en que se reutilizan residuos y se evita la sobreexplotación de agregados, en este caso, de la arena.

Este trabajo se limitó a la evaluación de las propiedades físicas y mecánicas a corto plazo (7 y 28 días) del hormigón con RCN y aunque se obtuvieron datos necesarios para el diseño y construcción de estructuras de hormigón, se desconoce el comportamiento físico-mecánico del RCN en el hormigón a largo plazo. Próximos estudios pueden considerar evaluar el hormigón con RCN a edades más avanzadas, mayores a 28 días. El estudio se limitó al uso de RCN no tratado, con miras a evitar impactos ambientales adicionales, sin embargo, se pueden utilizar y/o proponer tratamientos de bajo impacto que mejoren el desempeño mecánico del hormigón con RCN. Por último, la investigación demostró una factibilidad física-mecánica del uso de 5% RCN en el hormigón, pero no se determinó la reducción del impacto ambiental, por consiguiente, se requiere un análisis de los beneficios medioambientales del hormigón con RCN.

Futuros estudios pueden considerar el uso de Materiales Cementicios Suplementarios (MCS) a fin de mejorar el desempeño del hormigón con RCN y permitir un mayor porcentaje de reemplazo de arena por RCN. Paralelamente, es necesario evaluar la durabilidad del hormigón con RCN para garantizar la seguridad y funcionalidad de las edificaciones que consideren este material.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abd-Elaal, E. S., Araby, S., Mills, J. E., Youssf, O., Roychand, R., Ma, X., Zhuge, Y. y Gravina, R. J. (2019). Novel approach to improve crumb rubber concrete strength using thermal treatment. *Construction and Building Materials*, 229. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116901>
- Abdelmonem, A., El-Feky, M., Nasr, E. y Kohail, M. (2019). Performance of high strength concrete containing recycled rubber. *Construction and Building Materials*, 227. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.08.041>
- ABNT (2011). NBR 7222: Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos.

- Alwesabi, E., Bakar, B., Alshaiikh, I. y Akil, H. (2020). Experimental investigation on mechanical properties of plain and rubberised concretes with steel-polypropylene hybrid fibre. *Construction and Building Materials*, 233. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117194>
- Aslani, F., Ma, G., Wan, D. L. Y. y Muselin, G. (2018). Development of high-performance self-compacting concrete using waste recycled concrete aggregates and rubber granules. *Journal of Cleaner Production*, 182, 553-566. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.074>
- Asociación Española de Normalización (2020). *UNE-EN 12350-2: Ensayos de hormigón fresco. Parte 2: Ensayo de asentamiento*. UNE: Madrid, España.
- ASTM (2015a). *ASTM C127-15: Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate*. DOI: <https://doi.org/10.1520/C0127-15>
- ASTM (2015b). *ASTM C128-15: Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate*. DOI: <https://doi.org/10.1520/C0128-15>
- ASTM (2016). *ASTM C293/C293M-16: Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam With Center-Point Loading)*. DOI: https://doi.org/10.1520/C0293_C0293M-16
- ASTM (2020). *ASTM C136/C136M-19: Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates*. DOI: https://doi.org/10.1520/C0136_C0136M-19
- ASTM (2021). *ASTM C642-21. Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete*. DOI: <https://doi.org/10.1520/C0642-21>
- Bisht, K. y Ramana, P. (2017). Evaluation of mechanical and durability properties of crumb rubber concrete. *Construction and building materials*, 155, 811-817. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.131>
- CEN (2010). *CEN/TS 14243:10. Materials produced from end of life tyres - Specification of categories based on their dimension(s) and impurities and methods for determining their dimension(s) and impurities*. Recuperado de: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/713de38b-eb7a-4a4e-b1b1-fdf10f56a5f8/cen-ts-14243-2010>
- Czajczyńska, D., Krzyżyńska, R., Jouhara, H. y Spencer, N. (2017). Use of pyrolytic gas from waste tire as a fuel: A review. *Energy*, 134, 1121-1131. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.05.042>
- Derakhshan, Z., Ghaneian, M., Mahvi, A., Conti, G., Faramarzan, M., Dehghani, M. y Ferrante, M. (2017). A new recycling technique for the waste tires reuse. *Environmental research*, 158, 462-469. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.07.003>
- Eisa, A. S., Elshazli, M. T. y Nawar, M. T. (2020). Experimental investigation on the effect of using crumb rubber and steel fibers on the structural behavior of reinforced concrete beams. *Construction and Building Materials*, 252. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119078>
- Elchalakani, M. (2015). High strength rubberized concrete containing silica fume for the construction of sustainable road side barriers. *Structures*, 1, 20-38. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2014.06.001>
- Gesoğlu, M., Güneyisi, E., Khoshnaw, G. e İpek, S. (2014). Investigating properties of pervious concretes containing waste tire rubbers. *Construction and Building Materials*, 63, 206-213. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.046>
- Gravina, R. J. y Xie, T. (2022). Toward the development of sustainable concrete with Crumb Rubber: Design-oriented Models, Life-Cycle-Assessment and a site application. *Construction and Building Materials*, 315. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125565>
- Gurunandan, M., Phalgun, M., Raghavendra, T. y Udayashankar, B. (2019). Mechanical and damping properties of rubberized concrete containing polyester fibers. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31(2), 1-10. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002614](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002614)
- Hilal, N. (2017). Hardened properties of self-compacting concrete with different crumb rubber size and content. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 6(1), 191-206. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijjsbe.2017.03.001>
- Hosseini, A. H., Azarijafari, H. y Khoshnazar, R. (2022). The role of performance metrics in comparative LCA of concrete mixtures incorporating solid wastes: A critical review and guideline proposal. *Waste Management*, 140, 40-54. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.01.010>
- Huang, W., Huang, X., Xing, Q. y Zhou, Z. (2020). Strength reduction factor of crumb rubber as fine aggregate replacement in concrete. *Journal of Building Engineering*, 32. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101346>
- IBNORCA (1987). *CBH 87: Estructuras de hormigón. Norma Boliviana. Hormigón Armado*. Instituto Boliviano de Normalización y Calidad (IBNORCA). Recuperado de: https://cadecocruz.org.bo/UserFiles/File/CBH_87.pdf
- Kadhim, A. A. y Kadhim, H. M. (2021). Experimental investigation of rubberized reinforced concrete continuous deep beams. *Journal of King Saud University-Engineering Sciences* [en prensa]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2021.03.001>
- Kaish, A. B. M. A., Odimegwu, T. C., Zakaria, I. y Abood, M. M. (2021). Effects of different industrial waste materials as partial replacement of fine aggregate on strength and microstructure properties of concrete. *Journal of Building Engineering*, 35. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.102092>
- Kangavar, M. E., Lokuge, W., Manalo, A., Karunasena, W. y Frigione, M. (2022). Investigation on the properties of concrete with recycled polyethylene terephthalate (PET) granules as fine aggregate replacement. *Case Studies in Construction Materials*, 16. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e00934>
- Karunarathna, S., Linforth, S., Kashani, A., Liu, X. y Ngo, T. (2021). Effect of recycled rubber aggregate size on fracture and other mechanical properties of structural concrete. *Journal of Cleaner Production*, 314. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128230>
- Letelier, V., Bustamante, M., Muñoz, P., Rivas, S. y Ortega, J. M. (2021). Evaluation of mortars with combined use of fine recycled aggregates and waste crumb rubber. *Journal of Building Engineering*, 43. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103226>

- Li, Y., Zhang, X., Wang, R. y Lei, Y. (2019). Performance enhancement of rubberised concrete via surface modification of rubber: A review. *Construction and Building Materials*, 227. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116691>
- Marques, B., Antonio, J., Almeida, J., Tadeu, A., De Brito, J., Dias, S., Pedro, F. y Sena, J. D. (2020). Vibro-acoustic behaviour of polymer-based composite materials produced with rice husk and recycled rubber granules. *Construction and Building Materials*, 264. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120221>
- Moustafa, A. y Elgawady, M. (2015). Mechanical properties of high strength concrete with scrap tire rubber. *Construction and Building Materials*, 93, 249-256. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.115>
- Najim, K. B. y Hall, M. R. (2013). Crumb rubber aggregate coatings/pre-treatments and their effects on interfacial bonding, air entrapment and fracture toughness in self-compacting rubberised concrete (SCRC). *Materials and structures*, 46(12), 2029-2043. DOI: <https://doi.org/10.1617/s11527-013-0034-4>
- Oliveira Neto, G. C. D., Chaves, L. E. C., Pinto, L. F. R., Santana, J. C. C., Amorim, M. P. C. y Rodrigues, M. J. F. (2019). Economic, environmental and social benefits of adoption of pyrolysis process of tires: A feasible and ecofriendly mode to reduce the impacts of scrap tires in Brazil. *Sustainability*, 11(7). DOI: <https://doi.org/10.3390/su11072076>
- Pacheco-Torgal, F., Ding, Y. y Jalali, S. (2012). Properties and durability of concrete containing polymeric wastes (tyre rubber and polyethylene terephthalate bottles): An overview. *Construction and Building Materials*, 30, 714-724. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.11.047>
- Pham, N. P., Toumi, A. y Turatsinze, A. (2019). Effect of an enhanced rubber-cement matrix interface on freeze-thaw resistance of the cement-based composite. *Construction and Building Materials*, 207, 528-534. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.147>
- Rashid, K., Yazdanbakhsh, A. y Rehman, M. (2019). Sustainable selection of the concrete incorporating recycled tire aggregate to be used as medium to low strength material. *Journal of Cleaner Production*, 224, 396-410. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.197>
- Ren, F., Mo, J., Wang, Q. y Ho, J. C. M. (2022). Crumb rubber as partial replacement for fine aggregate in concrete: An overview. *Construction and Building Materials*, 343. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128049>
- Ross, D. E. (2020). Use of waste tyres in a circular economy. *Waste Management & Research*, 38(1), 1-3. DOI: <https://doi.org/10.1177/0734242X19895697>
- Saloni, Parveen, Pham, T., 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. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102448>
- Shahjalal, M., Islam, K., Rahman, J., Ahmed, K. S., Karim, M. R. y Billah, A. M. (2021). Flexural response of fiber reinforced concrete beams with waste tires rubber and recycled aggregate. *Journal of Cleaner Production*, 278. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123842>
- Silva, L., Mouta, J., Costa, M. y Gomes, L. (2019). Concreto com borracha de recauchutagem de pneu para uso em pavimentação de baixo tráfego. *Matéria (Rio de Janeiro)*, 24. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620190002.0676>
- Su, H., Yang, J., Ling, T., Ghataora, G. y Dirar, S. (2015). Properties of concrete prepared with waste tyre rubber particles of uniform and varying sizes. *Journal of Cleaner Production*, 91, 288-296. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.12.022>
- SWISSCONTACT (2020). Reciclaje de llantas, productos verdes con valor agregado. *Swisscontact*. Recuperado de: <https://www.swisscontact.org/es/noticias/reciclaje-de-llantas-productos-verdes-con-valor-agregado>
- Symeonides, D., Loizia, P. y Zorpas, A. (2019). Tire waste management system in Cyprus in the framework of circular economy strategy. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(35), 35445-35460. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-019-05131-z>
- Taha, M., El-Dieb, A., Abd El-Wahab, M. y Abdel-Hameed, M. (2008). Mechanical, fracture, and microstructural investigations of rubber concrete. *Journal of materials in civil engineering*, 20(10), 640-649. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2008\)20:10\(640\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2008)20:10(640))
- The Freedonia Group (2012). Global demand for aggregates to exceed 48 billion metric tons in 2015. *Concrete construction*. Recuperado de: https://www.concreteconstruction.net/business/global-demand-for-construction-aggregates-to-exceed-48-billion-metric-tons-in-2015_o
- Thomas, B. y Gupta, R. (2015). Long term behaviour of cement concrete containing discarded tire rubber. *Journal of Cleaner Production*, 102, 78-87. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.04.072>
- Trudsø, L. L., Nielsen, M. B., Hansen, S. F., Syberg, K., Kampmann, K., Khan, F. R. y Palmqvist, A. (2022). The need for environmental regulation of tires: Challenges and recommendations. *Environmental Pollution*, 311. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119974>
- Vargas, J. (2017). Llantas en botaderos, una bomba de tiempo. *Los tiempos*. Recuperado de: <https://www.lostiempos.com/actualidad/local/20170620/llantas-botaderos-bomba-tiempo>
- Wu, Y. F., Kazmi, S. M. S., Munir, M. J., Zhou, Y. y Xing, F. (2020). Effect of compression casting method on the compressive strength, elastic modulus and microstructure of rubber concrete. *Journal of Cleaner Production*, 264. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121746>
- Youssif, O., Mills, J. E. y Hassanli, R. (2016). Assessment of the mechanical performance of crumb rubber concrete. *Construction and Building Materials*, 125, 175-183. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.040>
- Zhang, W., Gong, S. y Zhang, J. (2018). Effect of rubber particles and steel fibers on frost resistance of roller compacted concrete in potassium acetate solution. *Construction and Building Materials*, 187, 752-759. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.244>