

Design of Lightweight Concrete with Recycled Rubber and its Influence on the Physical-Mechanical Properties in Multifamily Housing

Joaquín Samuel Támara Rodríguez, Doctor¹; Liliana Janet Chavarría Reyes, Doctor(c)²; Reynaldo Melquiades Reyes Roque, Doctor³; John Frayluis Barreto Palma, Magister⁴; Gustavo Gregorio De La Cruz Dueñas, Magister⁵; Alexander René Deza Sanz, Bachiller⁶; Aldhair Anthony Durand Carrasco, Bachiller⁷

^{1,3,4,5} Universidad Santiago Antúnez de Mayolo, Perú, jtamarar@unasam.edu.pe, rreyesr@unasam.edu.pe; jbarretop@unasam.edu.pe; gdelacruz@unasam.edu.pe.
^{2,6,7} Universidad Ricardo Palma, Perú, liliana.chavarría@urp.edu.pe; alexander.deza@urp.edu.pe; aldhair.durand@urp.edu.pe

Abstract. - The present study focused on the development of a lightweight concrete modified with the incorporation of recycled rubber (RC), with the purpose of improving its physical and mechanical properties for its application in multifamily buildings. The problem addressed arises from the need for a material that combines low density, good workability and resistance suitable for use in multi-family housing, while promoting sustainability through the reuse of rubber waste. In this context, the general objective was to design a lightweight concrete that improves these properties, guaranteeing a balance between structural efficiency and environmental benefits. The research is based on the principles of lightweight concrete and the impact that the incorporation of recycled materials has on its physical and mechanical properties, in order to evaluate its viability in sustainable structural applications. The study used the deductive scientific method, applied orientation, quantitative approach, descriptive, explanatory, correlational and descriptive level. Experimental, longitudinal, prospective design and cohort study (cause – effect), where the proportions of CR in the concrete were varied. The results obtained indicate that the incorporation of CR improves the workability of the mixture, but reduces the unit weight by up to 35.99% and increases the settlement by 75.00% when 20% of CR is added. In addition, a decrease in the compressive strength of 12.93% and in the tensile strength of 26.67% is observed. The optimal dosage was determined at 5% CR, as it allows a balance to be achieved between better workability

Keywords: - Lightweight concrete, recycled rubber, expanded clay, workability, mechanical properties.

Diseño de hormigón liviano con caucho reciclado y su influencia en las propiedades físico-mecánicas de viviendas Plurifamiliares

Joaquín Samuel Támara Rodríguez, Doctor¹; Liliana Janet Chavarría Reyes, Doctor(c)²; Reynaldo Melquiades Reyes Roque, Doctor³; John Frayluis Barreto Palma, Magister⁴; Gustavo Gregorio De La Cruz Dueñas, Magister⁵; Alexander René Deza Sanz, Bachiller⁶; Aldhair Anthony Durand Carrasco, Bachiller⁷

^{1,3,4,5} Universidad Santiago Antúnez de Mayolo, Perú, jtamarar@unasam.edu.pe, rreyesr@unasam.edu.pe; jbarretop@unasam.edu.pe; gdelacruz@unasam.edu.pe.
^{2,6,7} Universidad Ricardo Palma, Perú, liliana.chavarría@urp.edu.pe; alexander.deza@urp.edu.pe; aldhair.durand@urp.edu.pe

Resumen - El presente estudio se enfocó en el desarrollo de un hormigón ligero modificado con la incorporación de caucho reciclado (CR), con el propósito de mejorar sus propiedades físicas y mecánicas para su aplicación en edificaciones multifamiliares. La problemática abordada surge de la necesidad de un material que combine baja densidad, buena trabajabilidad y resistencia adecuada para su uso en viviendas multifamiliares, promoviendo al mismo tiempo la sostenibilidad a través de la reutilización de residuos de caucho. En este contexto, el objetivo general fue diseñar un hormigón ligero que mejore dichas propiedades, garantizando un equilibrio entre eficiencia estructural y beneficios ambientales. La investigación se basa en los principios del hormigón ligero y en el impacto que la incorporación de materiales reciclados tiene sobre sus propiedades físicas y mecánicas, con el fin de evaluar su viabilidad en aplicaciones estructurales sostenibles. El estudio utilizó el método científico deductivo, orientación aplicada, enfoque cuantitativo, tipo descriptivo, explicativo, correlacional y nivel descriptivo. Diseño experimental, longitudinal, prospectivo y estudio de cohorte (causa – efecto), donde se variaron las proporciones de CR en el hormigón. Los resultados obtenidos indican que la incorporación de CR mejora la trabajabilidad de la mezcla, pero reduce el peso unitario hasta en un 35.99% y aumenta el asentamiento en un 75.00% cuando se adiciona un 20% de CR. Además, se observa una disminución en la resistencia a la compresión del 12.93% y en la resistencia a la

tracción del 26.67%. La dosificación óptima se determinó en un 5 % de CR, ya que permite lograr un equilibrio entre una mejor trabajabilidad

Palabras claves: Hormigón ligero, caucho reciclado, arcilla expandida, trabajabilidad, propiedades mecánicas.

I. INTRODUCCIÓN

El desarrollo urbano en Lima Metropolitana ha generado una demanda de soluciones en la construcción que no solo cumplan los estándares de calidad, sino que también promuevan la sostenibilidad. Debido a ello, el presente estudio se centra en el diseño de un hormigón ligero modificado con CR, con el objetivo de mejorar sus propiedades físicas y mecánicas para su aplicación en edificaciones multifamiliares. En tal sentido se busca reducir el consumo de recursos naturales mediante la incorporación de materiales reciclados, los cuales, además de representar una alternativa más económica en comparación con los materiales convencionales, contribuyen a la eficiencia ambiental del sector constructivo.

El hormigón convencional es un material esencial en la industria de la construcción; sin embargo, en elementos destinados a la distribución de espacios o tabiquería, es posible optar por alternativas que optimicen la reducción del peso del material contribuye, desde el punto de vista estructural, a disminuir la carga muerta de la edificación, lo que a su vez permite optimizar el diseño de elementos

estructurales como vigas, columnas y cimentaciones, reduciendo sus dimensiones y mejorando la eficiencia constructiva. En este sentido, el hormigón con agregado liviano ha sido ampliamente utilizado a nivel global debido a sus propiedades de aislamiento térmico y acústico, así como a su favorable relación resistencia-peso [1].

El empleo de CR en la fabricación de hormigón presenta ventajas significativas, como la reducción de la densidad, la disminución de los esfuerzos estructurales y la optimización de costos de transporte. Existen diversos métodos para producir este tipo de hormigón, aunque los estudios y aplicaciones más comunes emplean arcilla expandida y residuos de neumáticos de caucho como agregados livianos. Estas técnicas suelen incluir sustituciones parciales o totales de los áridos convencionales [2].

La industria del cemento es una de las principales fuentes de emisiones de dióxido de carbono (CO₂), lo que contribuye significativamente a la contaminación ambiental. Por esta razón, la incorporación de materiales sostenibles en el sector de la construcción puede ser una estrategia efectiva para mitigar el impacto ambiental, reducir costos y fomentar la reutilización de materiales de desecho, así como la conservación de los recursos naturales [3].

Actualmente, la contaminación ambiental sigue representando un desafío global debido a la generación masiva de residuos. Muchos de estos desechos poseen características nocivas, como toxicidad, inflamabilidad o reactividad química, y suelen ser eliminados en vertederos, ocasionando problemas ambientales y riesgos para la salud. En particular, los residuos plásticos y de caucho constituyen una proporción significativa de los desechos sólidos y plantean un problema ambiental crítico debido a su resistencia a la degradación [4].

La gestión de neumáticos fuera de uso representa un desafío significativo debido a su alta durabilidad y resistencia a la degradación. A nivel mundial, el volumen de estos residuos ha aumentado como consecuencia del incremento en el uso de automóviles como principal medio de transporte, lo que ha generado una acumulación considerable de neumáticos desechados [5].

El sector de la construcción juega un papel clave en la satisfacción de la demanda habitacional y el desarrollo económico de los países. Como respuesta a estos retos, especialistas e investigadores han impulsado la innovación tecnológica en materiales de construcción, promoviendo la reutilización de desechos reciclables con el fin de satisfacer las

crecientes expectativas sociales y cumplir con estrictas normativas ambientales [6].

En los últimos años, se han desarrollado diversas investigaciones enfocadas en la optimización del caucho reciclado (CR) mediante tratamientos físicos y químicos que mejoran su adhesión con la matriz cementicia. Métodos como el pre-recubrimiento con pasta de cemento, el uso de alcohol polivinílico, hidróxido de sodio, agentes de acoplamiento de silano y compuestos a base de azufre han demostrado una mejora en el desempeño del CR en materiales cementicios. No obstante, estas técnicas presentan mejoras limitadas y resultan complejas de implementar a gran escala en la producción de hormigón [7].

Estudios sobre la incorporación de caucho granulado en hormigón convencional han evidenciado que su adición afecta negativamente las propiedades mecánicas, manifestándose en una reducción de la resistencia conforme se incrementa la cantidad de caucho utilizado [8]. Este efecto se debe al aumento de la porosidad y la disminución de la densidad del hormigón, lo que impacta significativamente en su resistencia mecánica y limita la proporción de caucho admisible en aplicaciones constructivas de carácter estructural [9].

Asimismo, es fundamental orientar las investigaciones hacia la construcción de viviendas multifamiliares, dado el creciente proceso de densificación en las áreas metropolitanas. En el contexto peruano, el país se encuentra entre los tres con mayor déficit habitacional o con un alto porcentaje de viviendas de baja calidad, lo que ha generado una demanda insatisfecha significativa. Tanto el sector público como el privado deberán desarrollar estrategias efectivas para abordar esta problemática en un corto y mediano plazo [10].

Por ello, resulta fundamental desarrollar investigaciones que permitan la reutilización de este material, principalmente en Lima, donde la elevada densidad vehicular genera un gran volumen de neumáticos en desuso. La industria de la construcción, en particular el sector de la vivienda, ofrece una oportunidad viable para la incorporación de estos materiales, contribuyendo tanto a la mejora de las propiedades del hormigón ligero como a la optimización del uso de recursos. Además, es necesario comparar las alternativas disponibles con el propósito de maximizar la eficiencia económica y garantizar la calidad del producto final.

El presente estudio cobra relevancia al evaluar el uso de materiales reciclados en la producción de

hormigón ligero, con un enfoque particular en el caucho triturado para su aplicación en tabiquería de edificaciones multifamiliares sostenibles. Este material representa una opción más accesible en comparación con los áridos convencionales extraídos de canteras. Asimismo, la incorporación de materiales reciclados en la fabricación de hormigón contribuye a la reducción del consumo de recursos naturales no renovables, aspecto clave para la sostenibilidad y la preservación de recursos a largo plazo. A diferencia de estudios previos que se han centrado en el análisis del desempeño de aditivos reciclados en hormigón, esta investigación establece una comparación entre el hormigón ligero con adición de CR y el hormigón convencional, evaluando su efecto en las propiedades físicas y mecánicas. El objetivo es determinar cuál de estas opciones ofrece un mejor rendimiento y mayor viabilidad económica en la producción de hormigón ligero destinado a tabiquería, asegurando la fiabilidad del material para su implementación en futuros proyectos constructivos.

El objetivo del estudio es diseñar un hormigón ligero que incorpore CR, estableciendo la dosificación óptima a través de un enfoque cuantitativo y un diseño experimental. La metodología empleada permite examinar el impacto de distintas proporciones de CR en las propiedades del hormigón, destacando mejoras en la trabajabilidad y una reducción del peso unitario.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación tiene una orientación aplicada, ya que propone una alternativa de hormigón ligero que puede ser implementada en diversos proyectos de infraestructura que demanden elementos de tabiquería. Se clasifica como un estudio de tipo descriptivo, explicativo y correlacional, dado que analiza la influencia del CR en el hormigón ligero desde una perspectiva técnica y económica. Asimismo, el estudio adopta un enfoque cuantitativo, basado en la recopilación y análisis de datos numéricos obtenidos a partir de ensayos de laboratorio, los cuales fueron procesados mediante herramientas estadísticas. Se considera una investigación descriptiva en la medida en que detalla las propiedades físicas y mecánicas del hormigón ligero con CR, así como sus costos de producción. El diseño de la investigación es experimental, ya que se llevaron a cabo múltiples ensayos en un entorno controlado, permitiendo la observación y medición de los efectos de distintas variables en las propiedades del material.

La población considerada para la investigación incluyó la totalidad de las muestras de los ensayos en estado fresco y en estado endurecido de hormigón ligero. En total, se prepararon 90 probetas de hormigón y se recolectaron 15 muestras de hormigón en estado fresco. Se usaron cinco tipos de mezclas de hormigón, de los cuales se extrajeron tres muestras por cada tipo en estado fresco con el propósito de llevar a cabo ensayos de trabajabilidad y determinación del peso unitario, como se muestra en la Tabla 1.

TABLA 1
MUESTRAS PARA EL ENSAYO DE TRABAJABILIDAD Y PESO UNITARIO CON CAUCHO RECICLADO (%)

Hormigón	Porcentaje de adición de CR (%)	Muestras Trabajabilidad	Muestras Peso unitario
	0	3	3
Hormigón ligero con adición de CR	5	3	3
	10	3	3
	15	3	3
	20	3	3
Total		15	15

En estado endurecido, se emplearon moldes cilíndricos de acero de 4 x 8 pulgadas para la conformación de las muestras de hormigón, con el objetivo de realizar ensayos a los 28 días y verificar su resistencia. Las probetas fueron extraídas del agua una hora antes de los ensayos de resistencia a la compresión, los cuales se llevaron a cabo a los 7, 14 y 28 días. En total, se utilizaron 45 probetas para las pruebas de resistencia a la compresión, distribuidas conforme a lo especificado en la Tabla 2.

TABLA 2
MUESTRAS PARA EL ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

Tipo de hormigón	Adición CR (%)	Probetas	Probetas/días		
			7	14	28
	0		3	3	3
Hormigón ligero con adición de CR	5		3	3	3
	10	45	3	3	3
	15		3	3	3
	20		3	3	3
Total		45			

Para los ensayos de resistencia a la tracción por compresión diametral, se utilizaron un total de 45 probetas, distribuidas conforme a lo indicado en la Tabla 3. Este ensayo consiste en aplicar una carga de compresión a lo largo del eje longitudinal de un espécimen cilíndrico de hormigón hasta provocar su falla a lo largo del diámetro.

TABLA 3
MUESTRAS PARA EL ENSAYO DE RESISTENCIA A LA TRACCIÓN

Tipo de hormigón	Porcentaje de adición de CR (%)	N° de probetas totales	N° de probetas por días a evaluar		
			7 días	14 días	28 días
Hormigón ligero con adición de CR	0	45	3	3	3
	5		3	3	3
	10		3	3	3
	15		3	3	3
	20		3	3	3
Total		45			

III. RESULTADOS

Para el diseño de la mezcla, se empleó una relación agua-cemento (a/c) de 0.43, junto con un aditivo superplastificante que permite reducir la cantidad de agua sin afectar la consistencia y la trabajabilidad del concreto. El asentamiento inicial fue de 3 pulgadas, determinándose una dosificación de agua de 200 litros por metro cúbico de concreto. Adicionalmente, se consideró un 2 % de aire atrapado en la mezcla, con el propósito de mejorar tanto las propiedades mecánicas como la durabilidad del material.

En este proceso de diseño, la selección del asentamiento inicial de 3" fue crucial para asegurar la consistencia y trabajabilidad deseada en el concreto. La cantidad de agua, fijada en 200 kg/m³, se estableció basándose en los requisitos de la mezcla para lograr la fluidez adecuada, mientras que el aire atrapado del 2% se tomó en cuenta para garantizar las propiedades físicas y mecánicas del concreto, de este modo, se evitan problemas asociados con la durabilidad y la resistencia del hormigón ligero a largo plazo.

Para la determinación de la cantidad de agregados, se empleó el método ACI, el cual permite obtener una dosificación precisa de materiales para el diseño de mezclas de concreto. Este procedimiento se basa en la medición de cemento, arena, grava y agua con el propósito de establecer las proporciones adecuadas de agregados finos y gruesos. El método ACI considera el volumen seco del agregado grueso y su relación con el tamaño máximo nominal y el módulo de finura, asegurando una distribución homogénea de las partículas en la mezcla. Esto contribuye a mejorar las propiedades físicas y mecánicas del concreto. En la Tabla 4 se presentan las dosificaciones en peso y volumen para la mezcla de concreto que incorpora un 20% de caucho reciclado (CR).

TABLA 4
DOSIFICACIÓN EN PESO Y VOLUMEN DE LA MEZCLA DE CONCRETO CON 20% DE CAUCHO RECICLADO (CR)

Materiales(kg/m ³)	Adición de CR (%)				
	0	5	10	15	20
Cemento	465.12	465.12	465.12	465.12	465.12
Arena gruesa	976.86	927.03	877.19	827.36	777.52
Arcilla expandida	168.4	168.4	168.4	168.4	168.4
CR	0	23.27	46.53	69.8	93.07
Agua efectiva	238.85	238.53	238.21	237.88	237.56
Aditivo superplastificante	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98

Dosificación óptima de CR para mejorar la trabajabilidad del hormigón ligero.

La Fig. 5 muestra la dosificación óptima de CR en el hormigón ligero, evidenciando el efecto del asentamiento (mm) al incorporar distintos porcentajes de CR (0%, 5%, 10%, 15% y 20%). Los resultados fueron obtenidos siguiendo los procedimientos y especificaciones técnicas establecidas en la norma peruana NTP 339.035 y en la norma internacional ASTM C143, las cuales definen los métodos para la medición del asentamiento en el concreto fresco.

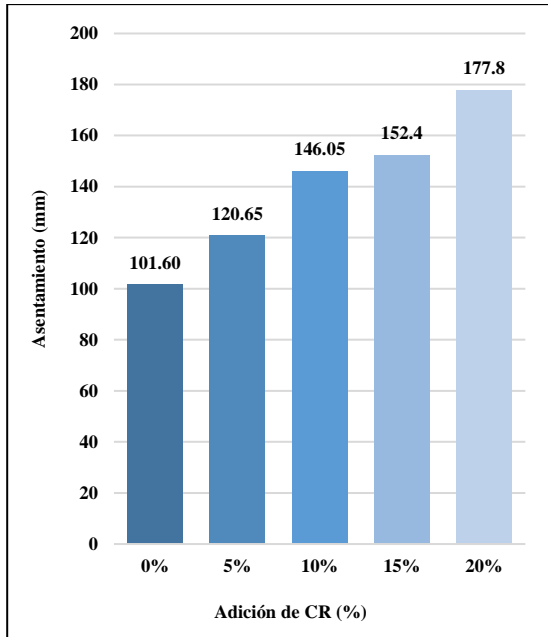


Fig. 5 Asentamientos del hormigón según la adición de caucho reciclado (CR)

El análisis previo indica que la dosificación óptima de CR mejora la trabajabilidad de la mezcla. En particular, al incorporar un 20% de CR, el asentamiento experimenta un incremento del 75%, lo que sugiere una mayor fluidez y facilidad de colocación del hormigón.

Dosificación óptima de CR se reduce el peso unitario del hormigón ligero

La dosificación óptima de CR contribuye a la reducción del peso unitario del hormigón ligero. Los resultados de esta investigación, representados en la Fig. 6, muestran un análisis comparativo de los pesos unitarios del hormigón ligero en función de las distintas adiciones de CR. Se observa que, a medida que aumenta el porcentaje de CR en la mezcla patrón, el peso unitario disminuye progresivamente. En particular, la adición del 20% de CR representa la condición más crítica, debido a su notable reducción en el peso unitario.

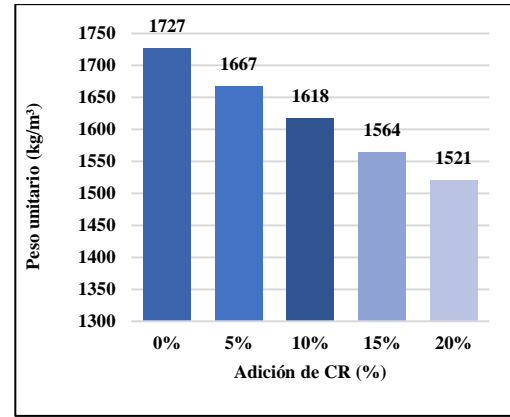


Fig. 6 Peso unitario del hormigón según la adición de caucho reciclado (CR)

El análisis previo confirma que la dosificación óptima de CR reduce significativamente el peso unitario del hormigón ligero. En particular, al incorporar un 20% de CR, se observa una disminución del 35.99%, lo que evidencia el impacto del material en la densidad de la mezcla.

Contenido de aire del concreto atrapado en el hormigón ligero

La determinación del contenido de aire en el concreto fresco se realizó siguiendo los lineamientos establecidos en la norma NTP 339.083, la cual especifica los procedimientos para la preparación de la muestra, la ejecución del ensayo y el cálculo del contenido de aire, además de los criterios para evaluar la precisión del método. En laboratorio, el procedimiento se llevó a cabo utilizando un recipiente húmedo colocado sobre una superficie plana, firme y nivelada. La mezcla de concreto fue vertida en el recipiente en tres capas sucesivas, cada una compactada mediante 25 golpes con una varilla compactadora y 15 golpes en las paredes del recipiente con un martillo de goma. Luego, la superficie de la mezcla fue nivelada con la varilla y se colocó una tapa para realizar la medición mediante un manómetro. En la Tabla 5 se presentan los valores obtenidos del contenido de aire en la mezcla de concreto según la proporción de CR incorporada.

TABLA 5
CONTENIDO DE AIRE SEGÚN LA ADICIÓN DE CAUCHO RECICLADO (CR)

Adición de CR (%)	Contenido de aire (%)
0.00	1.00
5.00	1.10
10.00	1.10
15.00	1.20
20.00	1.20

Dosificación óptima de caucho reciclado (CR) y su influencia en la resistencia a la compresión del hormigón ligero.

El análisis de la resistencia a la compresión de las muestras de hormigón ligero con diferentes proporciones de caucho reciclado (CR) revela la evolución de esta propiedad mecánica (kg/cm²) en función del tiempo de curado (0, 7, 12, 21 y 28 días). Se evaluaron cuatro porcentajes de incorporación de CR (0%, 5%, 10%, 15% y 20%), observándose una reducción progresiva en la resistencia a medida que aumenta la proporción de CR en comparación con la muestra de referencia. Según los datos presentados en la Fig. 7, la dosificación óptima de CR se establece en un 5%, alcanzando una resistencia de 143.43 kg/cm², lo que representa una disminución del 11.98% respecto a la muestra patrón.

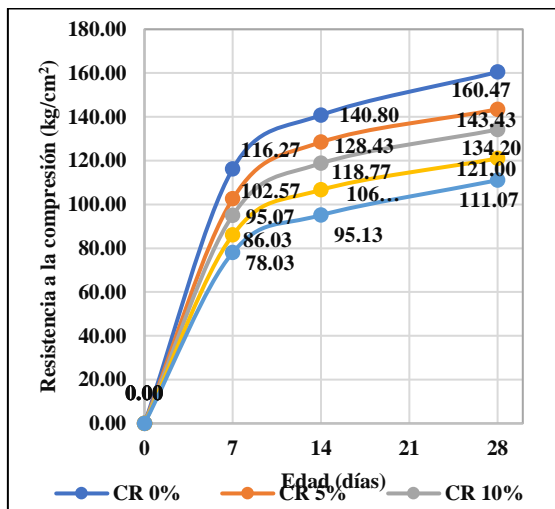


Fig. 7 Curva de resistencia a la compresión de las muestras según la adición de caucho reciclado (CR)

Los resultados de esta investigación se presentan en la Tabla 6, donde se lleva a cabo un análisis comparativo de la resistencia a la compresión

del hormigón ligero en función de las distintas proporciones de CR, evaluadas a los 28 días de curado.

TABLA 6
RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN LIGERO SEGÚN SUS ADICIONES DE CAUCHO RECICLADO (RC)

Descripción	Resistencia a la compresión a 28 días (kg/cm ²)
CR 0%	160.47
CR 5%	143.43
CR 10%	134.20
CR 15%	121.00
CR 20%	111.07

En relación con el análisis previo, se evidencia que el incremento en la dosificación de CR conlleva una reducción en la resistencia a la compresión del hormigón ligero, siendo esta disminución más pronunciada a mayores porcentajes de incorporación de CR.

Dosificación óptima de caucho reciclado y su influencia en la resistencia a la tracción del hormigón ligero.

La evolución de la resistencia a la tracción de las muestras de hormigón ligero con diferentes proporciones de caucho reciclado (CR) se representa mediante una curva que muestra la variación de esta propiedad mecánica (kg/cm²) en función del tiempo de curado (0, 7, 12, 21 y 28 días). Se evaluaron cuatro niveles de incorporación de CR (0%, 5%, 10% y 15%), evidenciándose una reducción en la resistencia a la tracción con respecto a la muestra de control. Según los datos presentados en la Fig. 8, la dosificación óptima de CR corresponde al 5%, alcanzando una resistencia de 14.73 kg/cm², lo que representa una disminución del 7.47% en comparación con la muestra patrón.

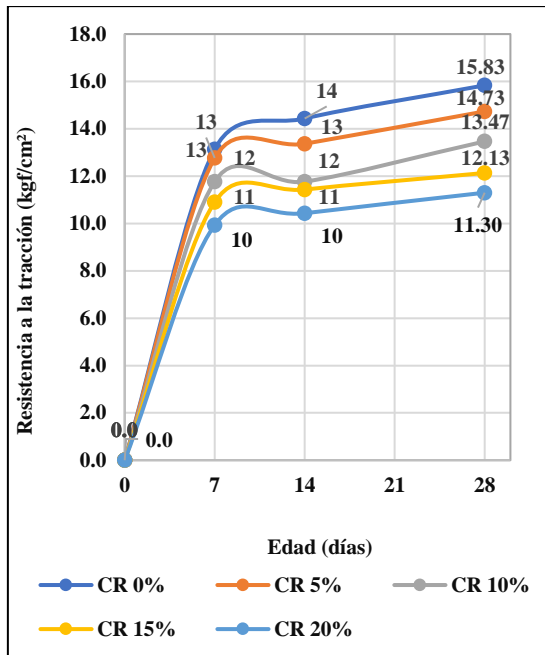


Fig. 8 Curva de resistencia a la tracción de las muestras según la adición de CR

Los resultados de esta investigación se presentan en la Tabla 7, donde se lleva a cabo un análisis comparativo de la resistencia a la tracción del hormigón ligero con diferentes adiciones de CR, evaluadas a los 28 días de curado. Este análisis destaca la capacidad del material para resistir la falla, evidenciando el impacto de la incorporación de CR en su comportamiento mecánico.

TABLA 7
RESISTENCIA A LA TRACCIÓN DEL HORMIGÓN LIGERO SEGÚN SUS ADICIONES DE CAUCHO RECICLADO (RC)

Descripción	Resistencia a la tracción a 28 días (kg/cm ²)
CR 0%	15.83
CR 5%	14.73
CR 10%	13.47
CR 15%	12.13
CR 20%	11.30

En relación con el análisis previo, se observa que el aumento en la dosificación de CR conlleva una reducción en la resistencia a la tracción del hormigón

ligero, siendo esta disminución más significativa a mayores porcentajes de incorporación de CR.

Discusión. - Para la comparación de resultados con estudios previos, se realizó una conversión de los valores reportados por otros autores, dado que utilizaron moldes de probetas distintos a los empleados en esta investigación. Esta conversión se llevó a cabo conforme a la metodología descrita en [11], y en el caso de moldes especiales, fue necesario interpolar los valores obtenidos. Asimismo, considerando que el hormigón ligero está diseñado para construcciones livianas y se compone de cemento Portland, agua, agente espumante y aire comprimido, se adoptó la clasificación establecida en la norma NTP-E.060 [12]. Según esta normativa, un hormigón se considera liviano si su densidad oscila entre 1430 kg/m³ y 1850 kg/m³ [13]. Los ensayos de trabajabilidad evidenciaron un aumento en el asentamiento con la incorporación de CR en distintas proporciones, lo que concuerda con los hallazgos reportados por [5], reafirmando la tendencia observada en esta investigación.

Se elaboraron mezclas con una relación agua/cemento de 0.38 y porcentajes de adición de CR del 0%, 5%, 10%, 15% y 20%, utilizando un aditivo superplastificante para mejorar la trabajabilidad. Los resultados mostraron que, a medida que aumentaba el porcentaje de CR, también se incrementaba el asentamiento de la mezcla, obteniéndose valores de 90, 105, 110, 125 y 130 mm, respectivamente. Además, [14] realizaron diversas mezclas con una relación agua-cemento de 0.50 y porcentajes de adición de CR del 2%, 5%, 10% y 20%, registrando asentamientos de 82, 96, 109 y 124 mm, respectivamente. Estos resultados confirman que la incorporación de CR incrementa el asentamiento de las mezclas.

Los hallazgos concuerdan con lo expuesto por [5] y [2], quienes, en sus ensayos de peso unitario para porcentajes de 0%, 5%, 10%, 15% y 20% de CR, evidenciaron que un mayor contenido de caucho reduce el peso unitario. Los resultados obtenidos muestran una disminución en el peso unitario que varía entre un 1.7% y un 21.3% en comparación con sus respectivos diseños de control.

Los resultados obtenidos guardan coherencia con lo planteado por [5], [2] y [8], quienes, en sus ensayos de resistencia a la compresión, evidenciaron que una adición del 20 % de CR, después de 28 días de curado, provocó una reducción significativa en la resistencia en comparación con la mezcla control de cada autor seleccionado. Dicha disminución alcanzó valores críticos que oscilan entre un 13.2 % y un 63.6

% . De manera similar, los ensayos de resistencia a la tracción presentaron concordancia con los estudios de [5] y [2], observándose una reducción considerable en la resistencia con una adición del 20 % de CR tras 28 días de curado, con valores críticos que varían entre un 26.5 % y un 37.1 %.

CONCLUSIONES

La incorporación de CR en el hormigón ligero mejora la trabajabilidad de la mezcla y reduce su peso unitario; sin embargo, también disminuye su resistencia a la compresión y tracción. Si bien la adición de CR aporta beneficios en términos de consistencia y densidad, su influencia negativa en las propiedades mecánicas debe ser considerada. Se ha determinado que la dosificación óptima es del 5 % de CR, ya que permite alcanzar un equilibrio entre una mejor trabajabilidad y una menor pérdida de resistencia. En cuanto a la trabajabilidad, en comparación con la mezcla control, se observan variaciones del 18.8 %, 43.8 %, 50.0 % y 75.0 %, respectivamente. A partir de una adición del 5 % de CR, la consistencia de la mezcla cambia de plástica a fluida, lo cual no es recomendable, ya que una excesiva trabajabilidad puede ser perjudicial. Respecto al peso unitario, las variaciones en comparación con la mezcla control son del 3.5 %, 6.3 %, 9.4 % y 11.9 %, manteniéndose dentro del rango normativo del hormigón ligero, que oscila entre 1430 kg/m³ y 1850 kg/m³. Para la resistencia a la compresión, se registran variaciones del 10.6 %, 16.4 %, 24.6 % y 30.8 %, respectivamente. En este sentido, para evitar una reducción significativa en la resistencia estructural, se considera óptima una adición del 5 % de CR, con la cual la resistencia a la compresión disminuye en un 12.93 % y la resistencia a la tracción en un 26.67 %.

AGRADECIMIENTO

A las Universidades Ricardo Palma (URP) y Santiago Antúnez de Mayolo (UNASAM) lo por los asesores especialistas y metodólogos que participaron en la elaboración del presente artículo.

REFERENCIAS

[1] Atyia M. M., Mahdy, M. G., y Elrahman, M. A. (2021). Production and properties of lightweight concrete incorporating recycled waste crushed clay bricks. *Revista Construction and Building Materials*, 304, 1-17. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.124655

[2] Angelin, A. F., Cecche Lintz, R. C., Osorio, W. R. y Gachet, L. A. (2020). Evaluation of efficiency factor of a self-compacting lightweight concrete with rubber and expanded

clay contents. *Revista Construction and Building Materials*, 257, 1-10. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119573

- [3] Zamora-Castro, S. A., Salgado-Estrada, R., Sandoval-Herazo, L. C., Melendez-Armenta, R. A., Manzano-Huerta, E., Yelmi-Carrillo, E., & Herrera-May, A. L. (2021). Sustainable development of concrete through aggregates and innovative materials: A review. In *Applied Sciences (Switzerland)* (Vol. 11, Issue 2, pp. 1–28). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/app11020629>
- [4] Alyousef, R., Ahmad, W., Ahmad, A., Aslam, F., Joyklad, P., & Alabduljabbar, H. (2021). Potential use of recycled plastic and rubber aggregate in cementitious materials for sustainable construction: A review. In *Journal of Cleaner Production* (Vol. 329). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129736>
- [5] Akbari, M., Nezhad, M., Fallah, S., Zadeh, M., y Asghari, M. (2022). Investigating fracture characteristics and ductility of lightweight concrete containing crumb rubber by means of WFM and SEM methods. *Revista Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 117, 1-15. doi: 10.1016/j.tafmec.2021.103148
- [6] Mei, J., Xu, G., Ahmad, W., Khan, K., Amin, M. N., Aslam, F., & Alaskar, A. (2022). Promoting sustainable materials using recycled rubber in concrete: A review. In *Journal of Cleaner Production* (Vol. 373). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133927>
- [7] Zainal, S. M. I. S., Mattius, D., Baba, Z., Rizalman, A. N., & Hejazi, F. (2023). Improving the Performance of Lightweight Crumb Rubber Mortar Using Synthetic, Natural, and Hybrid Fiber Reinforcements. *Fibers*, 11(1). <https://doi.org/10.3390/fib11010009>
- [8] Pongsopha, P., Sukontasukkul, P., Zhang, H., & Limkatanyu, S. (2022). Thermal and acoustic properties of sustainable structural lightweight aggregate rubberized concrete. *Results in Engineering*, 13. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100333>
- [9] Bala, A., & Gupta, S. (2021). Thermal resistivity, sound absorption and vibration damping of concrete composite doped with waste tire Rubber: A review. In *Construction and Building Materials* (Vol. 299). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123939>
- [10] Prinz Rodríguez, C. y Erich Ruberli, E. (2018). Diseño y factibilidad de un conjunto de viviendas multifamiliares sostenibles y de bajo costo en Chaclacayo - Lima. [Tesis de Grado, Universidad Ricardo Palma]. Obtenido de: <https://hdl.handle.net/20.500.14138/1957>.
- [11] ONNCCE (2015). Correlación de la resistencia a la compresión en cubos y cilindros. *Construcción y Tecnología en Hormigón*. <https://www.imcyc.com/revistacyt/index.php/tecnologia/369-de-acuerdo-a-nmx-c-155-onncce-2014-correlacion-de-la-resistencia-a-la-compresion-en-cubos-y-cilindros>
- [12] NTP-E.060 (2029). NORMA E.060 Concreto Armado. Edición Servicio Nacional de Capacitación para la Industria de la Construcción (SENCICO). <https://www.cip.org.pe/publicaciones/2021/enero/portal/e.060-concreto-armado-sencico.pdf>
- [13] Canahua, S. F. (2014). Los beneficios del concreto celular. *CIV neomateriales*, 36-37.

<https://revistas.pucp.edu.pe/index.php/civilizate/article/view/12961>

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