

Sustainable Lightweight Concrete with Recycled Rubber for Weight Reduction and Improved Mechanical Properties

Carlos Magno Chavarry Vallejos, Doctor¹; Liliana Janet Chavarría Reyes, Doctor(c)²; Joaquín Samuel Támara Rodríguez, Doctor³; Enriqueta Pereyra Salardi, Doctor(c)⁴; Jackeline Carol Escobar Serrano, Magister⁵; Kelly Raquel Pazos Sedano, Magister⁶; David Minaya Huerta, Doctor⁷

^{1,2,4,5} Universidad Ricardo Palma, Perú, carlos.chavarry@urp.edu.pe; liliana.chavarria@urp.edu.pe; enriqueta.pereyra@urp.edu.pe; jackeline.escobar@urp.edu.pe, ^{3,6,7} Universidad Santiago Antúnez de Mayolo, Perú, jtamarar@unasam.edu.pe, kpazoss@unasam.edu.pe, dminayah@unasam.edu.pe

Abstract.- *This study focused on developing lightweight concrete incorporating recycled rubber (RR), aiming to optimize its physical and mechanical properties for use in multi-family housing. The research addressed the need for a material that combines lightness, workability, and adequate strength for residential structures. It significantly contributes to sustainability and environmental protection by reusing rubber waste. A deductive scientific method was employed, with a quantitative experimental design that varied RR proportions in the concrete to define the ideal dosage. The results show that adding RR positively impacted the concrete's physical properties. Mix workability significantly improved, evidenced by a notable 75% increase in slump when 20% RR was incorporated. Concomitantly, the unit weight decreased by up to 35.99%. However, this addition led to a 12.93% reduction in compressive strength and a 26.67% reduction in tensile strength. The optimal RR dosage was determined to be 5%, achieving a balance between improved workability and a smaller 5.6% reduction in compressive strength compared to the control sample. This work highlights the relevance of innovation in civil engineering for sustainability and environmental protection by proposing a construction solution that revalues industrial waste.*

Keywords.- *Lightweight concrete, recycled rubber, sustainability, mechanical properties, sustainable construction.*

Hormigón Ligero Sostenible con Caucho Reciclado para la Reducción de Peso y la Mejora de Propiedades Mecánicas

Carlos Magno Chavarry Vallejos, Doctor¹; Liliana Janet Chavarría Reyes, Doctor(c)²; Joaquín Samuel Támara Rodríguez, Doctor³; Enriqueta Pereyra Salardi, Doctor(c)⁴; Jackeline Carol Escobar Serrano, Magister⁵; Kelly Raquel Pazos Sedano, Magister⁶; David Minaya Huerta, Doctor⁷

^{1,2,4,5} Universidad Ricardo Palma, Perú, carlos.chavarry@urp.edu.pe; liliana.chavarria@urp.edu.pe; enriqueta.pereyra@urp.edu.pe; jackeline.escobar@urp.edu.pe, ^{3,6,7} Universidad Santiago Antúnez de Mayolo, Perú, jtamarar@unasam.edu.pe, kpazoss@unasam.edu.pe, dminayah@unasam.edu.pe

Resumen - Este estudio se centró en el desarrollo de un hormigón ligero con la incorporación de caucho reciclado (CR), buscando optimizar sus propiedades físicas y mecánicas para su aplicación en viviendas multifamiliares. La investigación abordó la necesidad de un material que combinara ligereza, trabajabilidad y resistencia adecuada para estructuras habitacionales, contribuyendo significativamente a la sostenibilidad y la protección ambiental mediante la reutilización de residuos de caucho. Se empleó un método científico deductivo, con un diseño experimental cuantitativo que varió las proporciones de CR en el hormigón, para definir la dosificación idónea. Los resultados obtenidos reflejan que la adición de CR mejoró la trabajabilidad de la mezcla, incrementando el asentamiento en un 75% al incorporar 20% de CR. Concomitantemente, se redujo el peso unitario hasta un 35.99%. No obstante, esta adición conllevó una reducción del 12.93% en la resistencia a la compresión y del 26.67% en la resistencia a la tracción. La dosificación óptima de CR se estableció en 5%, logrando un equilibrio entre una mejor trabajabilidad y una menor reducción (5.6%) en la resistencia a la compresión respecto a la muestra patrón. Este trabajo subraya la relevancia de la innovación en ingeniería civil para la sostenibilidad y la protección del medio ambiente, al proponer una solución constructiva que revaloriza residuos industriales.

Palabras clave: Hormigón ligero, caucho reciclado, sostenibilidad, propiedades mecánicas, construcción sostenible.

I. INTRODUCCIÓN

La industria global de la construcción es un gran consumidor de recursos y generador de millones de toneladas de residuos anualmente. Esta realidad subraya la urgencia de adoptar estrategias de sostenibilidad, como la reutilización de desechos de construcción y demolición (RCD). La integración de materiales reciclados, como el caucho de neumáticos (CR) y los agregados de concreto reciclado (RCA), ofrece múltiples ventajas. No solo reduce la acumulación de residuos en vertederos, sino que también conserva materiales vírgenes, disminuye el consumo energético y reduce las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), impulsando así una economía circular.

Aunque el hormigón convencional es fundamental, para elementos como la tabiquería se buscan alternativas ligeras que reduzcan las cargas estructurales. El hormigón con agregado liviano, ya utilizado globalmente por sus propiedades de aislamiento térmico y acústico, además de su alta relación resistencia-peso [1], disminuye la masa específica

y los costos de transporte. En este ámbito, la investigación se centra en el CR y la arcilla expandida como agregados livianos, explorando sustituciones totales o parciales [2].

La producción de cemento es una fuente significativa de emisiones de CO₂. El uso de materiales sostenibles como el CR no solo reduce estas emisiones y los costos, sino que también fomenta la reutilización de desechos [3]. Residuos como plásticos y caucho, por su persistencia y sus propiedades dañinas, generan graves problemas ambientales si no se gestionan adecuadamente [4]. En un contexto específico como las zonas altoandinas, se ha investigado cómo la combinación de caucho y plástico reciclado en el concreto puede disminuir su densidad y mejorar su resistencia a la flexión (con un 5% de modificación). Sin embargo, esto también ha mostrado un impacto negativo en la resistencia a la compresión y el asentamiento, lo que exige ajustes en el diseño de la mezcla para asegurar la funcionalidad estructural en condiciones extremas [5].

La gestión global de neumáticos usados es un reto considerable debido a su durabilidad y resistencia a la degradación, lo que resulta en una acumulación constante de residuos [6]. El sector de la construcción, un pilar para el desarrollo económico busca activamente nuevas tecnologías y la aplicación de desechos reciclables para satisfacer las exigencias sociales y ambientales [7]. Recientemente, la investigación se ha enfocado en mejorar el desempeño del CR en mezclas cementicias. Se han explorado tratamientos químicos y físicos para optimizar la adherencia entre el CR y el cemento, incluyendo el pre-recubrimiento con pasta de cemento o el uso de aditivos [8]. Sin embargo, la complejidad de muchos de estos métodos dificulta su escalabilidad en la producción de hormigón a gran escala. Además, la adición de caucho granulado tiende a impactar negativamente las propiedades mecánicas del hormigón convencional, disminuyendo su resistencia a medida que aumenta la proporción de CR debido al incremento de la porosidad y la reducción de la densidad, lo que actualmente limita su uso en aplicaciones estructurales [9].

En Perú, por ejemplo, el alto déficit de viviendas de calidad exige respuestas urgentes [10], en este contexto, la reutilización efectiva de neumáticos usados es indispensable, especialmente en ciudades densamente pobladas como Lima,

donde el volumen de estos residuos es considerable. La industria de la construcción, particularmente el sector de viviendas presenta una gran oportunidad para incorporar materiales reciclados. Esto no solo mejora las propiedades del hormigón ligero, sino que también permite optimizar recursos y priorizar la calidad. Este estudio es relevante porque analiza el caucho triturado como una alternativa económica para el hormigón ligero en la tabiquería de viviendas sostenibles. Su implementación contribuye significativamente a reducir el consumo de recursos naturales no renovables y a promover la sostenibilidad a largo plazo.

A diferencia de investigaciones previas que solo comparaban el hormigón ligero con CR con el hormigón convencional, el trabajo busca la opción óptima en rendimiento y costo para la tabiquería, garantizando la fiabilidad de este material en futuros proyectos constructivos. El estudio [11] se centró en el diseño de un hormigón ligero con CR. Utilizando un enfoque cuantitativo y un diseño experimental, el objetivo principal fue determinar la dosificación óptima de CR.

La metodología empleada permitió analizar cómo las diferentes proporciones de CR impactan las propiedades del hormigón. Se observaron mejoras notables en la trabajabilidad y una reducción significativa del peso unitario. La adición de partículas de caucho (CR) al concreto presenta el beneficio de aligerar el material. Además, la combinación de CR y vidrio sódico cálcico puede mantener la resistencia inicial y mejorar el comportamiento a altas temperaturas, especialmente con un 30% de reemplazo de agregado fino por vidrio, lo que contribuye a un diseño resiliente [12].

A pesar de que estudios iniciales mostraron una disminución en las propiedades mecánicas, como la resistencia a la compresión, debido a la debilidad inherente del caucho y la interfaz débil con la pasta de cemento, la investigación ha revelado que el caucho confiere al concreto mayor ductilidad, resistencia al impacto y capacidad de disipar energía. Estas propiedades son valiosas en zonas sísmicas o ante cargas dinámicas [13].

Investigaciones recientes buscan superar estas deficiencias sin perder ligereza y tenacidad. Trabajos como el de [14] demuestran que, optimizando aditivos y pre-tratando la superficie del caucho, se mejora la adherencia con la matriz de cemento, mitigando la pérdida de resistencia y acercando el concreto ligero con CR a aplicaciones estructurales. Además, [15] han demostrado que el caucho puede mejorar la resistencia a la fatiga y la durabilidad bajo cargas cíclicas, prolongando la vida útil de elementos como pavimentos o puentes.

A pesar de los desafíos en la integración del caucho, la investigación continua del hormigón busca mejorar sus propiedades y reducir su impacto ambiental. Este trabajo, al proporcionar datos para hormigones más sostenibles y ligeros, abre nuevas vías para la reutilización de caucho a gran escala, promoviendo prácticas constructivas innovadoras y responsables, alineadas con el desarrollo sostenible y la protección ambiental.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

La presente investigación se desarrolló bajo una orientación aplicada, buscando ofrecer una alternativa de hormigón que pueda ser implementada en diversos proyectos de infraestructura, particularmente en elementos de tabiquería. El estudio fue de tipo descriptivo, explicativo y correlacional, enfocado en determinar la influencia del CR en el hormigón ligero, tanto desde una perspectiva técnica como económica. Se adoptó un enfoque cuantitativo, recolectando datos numéricos a partir de ensayos de laboratorio, los cuales fueron posteriormente procesados mediante herramientas estadísticas.

El diseño de la investigación fue de naturaleza experimental, lo que permitió la observación y medición de los efectos de diferentes variables en un entorno controlado. Se llevó a cabo un conjunto de múltiples ensayos para detallar las características físicas, mecánicas y los costos de producción de esta innovadora opción de hormigón ligero que utiliza CR. La incorporación de CR en el hormigón ligero no solo se evaluó por sus propiedades de ingeniería, sino también por su potencial para reducir el impacto ambiental asociado a la gestión de residuos de neumáticos, alineándose con los principios de sostenibilidad y economía circular en la construcción.

La población para esta investigación consistió en la totalidad de muestras en estado fresco y probetas de hormigón ligero. Se obtuvieron 90 probetas de hormigón endurecido y 15 mezclas de hormigón fresco. Se emplearon cinco tipos de mezcla de hormigón, para cada uno de los cuales se tomaron tres muestras en estado fresco. Estas muestras fueron utilizadas para realizar ensayos de trabajabilidad (asentamiento de cono de Abrams) y peso unitario, conforme a lo establecido en la Tabla 1.

La metodología de ensayo de las propiedades mecánicas incluyó pruebas de resistencia a la compresión y a la tracción, realizadas de acuerdo con las normativas peruanas para hormigones. Todos los procedimientos de muestreo y ensayo se ejecutaron en un laboratorio bajo condiciones controladas para asegurar la precisión y fiabilidad de los datos. El análisis de datos se realizó mediante técnicas estadísticas descriptivas e inferenciales para identificar las relaciones entre la dosificación de CR y las propiedades del hormigón, sin incluir interpretaciones ni resultados en esta sección.

El siguiente análisis se centra en la Tabla 1, que resume los datos relevantes para el "Diseño de mezcla con agregado de hormigón reciclado (RCA)". Esta tabla detalla parámetros clave del diseño experimental, como el número de mezclas, el tipo y porcentajes de reemplazo de RCA, el pretratamiento, y el aditivo utilizado, así como el rango de trabajabilidad objetivo y la fuente de recomendación. La Tabla 1 detalla un estudio de diseño de mezcla de hormigón con RCA. Se prepararon 12 mezclas, utilizando RCA grueso y fino en reemplazos del 25%, 50%, y 100%. El RCA fue remojado previamente para eliminar impurezas. Se usó superplastificante para lograr una trabajabilidad de 850 a 550 mm, siguiendo recomendaciones de EFNARC. Esto demuestra

una metodología robusta para evaluar el impacto del RCA en el hormigón.

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

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

En la Tabla 2, titulada "Muestras para el Ensayo de Resistencia a la Compresión". Esta tabla es comprende la planificación experimental de un estudio que investiga el efecto del CR en la resistencia a la compresión del hormigón ligero. La tabla muestra que se prepararon un total de 45 probetas para el ensayo de resistencia a la compresión. Se establecieron 5 diferentes porcentajes de adición de CR (0%, 5%, 10%, 15%, 20%) para el hormigón ligero. Para cada porcentaje de CR, se realizaron 3 probetas, las cuales serían ensayadas a los 7, 14 y 28 días. Esta organización permite una evaluación integral del desarrollo de la resistencia con el tiempo y la influencia del CR.

TABLA 2
MUESTRAS PARA EL ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

Tipo de hormigón	Adición CR (%)	Probetas	Probetas/días		
			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			

En conclusión, la Tabla 2 detalla la meticulosa planificación experimental de un estudio que busca entender cómo el caucho reciclado (CR) afecta la resistencia a la compresión del hormigón ligero. La metodología empleada y el diseño experimental propuesto es importante para obtener

resultados fiables y comprender a fondo el comportamiento de este material innovador.

En la Tabla 3, titulada "Muestras para el Ensayo de Resistencia a la Tracción", presenta la planificación experimental de un estudio que investiga el efecto de la adición de CR en la resistencia a la tracción del hormigón ligero.

TABLA 3
MUESTRAS PARA EL ENSAYO DE RESISTENCIA A LA TRACCIÓN

Tipo de hormigón	Adición de CR (%)	N° de probetas totales	Probetas/días		
			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			

La Tabla 3 muestra que se prepararon un total de 45 probetas para el ensayo de resistencia a la tracción. Se establecieron 5 diferentes porcentajes de adición de CR (0%, 5%, 10%, 15%, 20%) para el hormigón ligero. Para cada porcentaje de CR, se moldearon 3 probetas que serían ensayadas a los 7, 14 y 28 días. Esta organización permite una evaluación detallada de la resistencia a la tracción a lo largo del tiempo y su relación con la dosificación de CR.

Para la realización de esta investigación, se recurrió a una diversidad de documentos, artículos científicos, libros especializados, normas técnicas y fuentes de datos que garantizaron la rigurosidad metodológica y la contextualización de los resultados. Entre las normativas técnicas consultadas y aplicadas se encuentran las de la American Society for Testing and Materials (ASTM) y el Instituto Nacional de Calidad (INACAL): ASTM C143/C143M-20: *Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete* [15], la ASTM C39/C39M-20: *Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens* [16], la NTP 339.035: Concreto. Método de ensayo normalizado para la medición del asentamiento del concreto de cemento hidráulico [17], y la NTP 339.083: Concreto. Método de ensayo para determinar el contenido de aire en el concreto fresco por el método de presión [18]. Estos marcos normativos fueron importantes para la estandarización de los ensayos y la validez de las mediciones realizadas, asegurando la fiabilidad de los datos presentados en la Tabla 1 y en el resto de los resultados de este estudio.

III. RESULTADOS

Para el diseño de la mezcla de concreto se utilizó una relación agua-cemento (a/c) de 0.43 y un aditivo superplastificante. Este aditivo fue necesario para mantener la trabajabilidad y consistencia adecuadas con una cantidad de agua de 200 L/m³ de concreto, a partir de un asentamiento inicial de 3 pulgadas. Se consideró un 2% de aire atrapado en la mezcla para asegurar sus propiedades físicas y mecánicas, así como su durabilidad. La selección de un asentamiento inicial de 3 pulgadas fue determinante para la consistencia y trabajabilidad. La cantidad de agua se fijó en 200 kg/m³ para la fluidez, y el 2% de aire atrapado garantizó la calidad del concreto a largo plazo.

Para determinar las proporciones de los agregados en la mezcla, se utilizó el método ACI (*American Concrete Institute*). Este enfoque permitió calcular con precisión las cantidades necesarias de cemento, agua, grava y arena. El método ACI se fundamenta en la determinación del volumen seco compactado del agregado grueso, estableciendo una relación directa entre su tamaño máximo nominal y su módulo de finura. Esta cuidadosa consideración asegura una distribución uniforme de las partículas dentro de la mezcla, lo cual es crucial para optimizar las propiedades físicas y mecánicas finales del hormigón.

En particular, la dosificación específica en peso y volumen de la mezcla de concreto que incorporó un 20% de caucho reciclado (CR) se presenta detalladamente en la Tabla 4. Esta tabla es fundamental para replicar y comprender la composición de la mezcla utilizada en el estudio, resaltando la precisión del método ACI en la creación de hormigones con adiciones especiales como el CR. La aplicación de este método estandarizado garantiza la consistencia y la fiabilidad de los resultados, permitiendo una base sólida para futuras investigaciones y aplicaciones prácticas en la construcción sostenible. La optimización lograda mediante el método ACI es esencial para maximizar los beneficios del caucho reciclado en el hormigón, contribuyendo a la reducción de residuos y al uso eficiente de los recursos.

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

Componentes del hormigón	Adición de CR (%)				
	0	5	10	15	20
Cemento (kg/m ³)	465	465	465	465	465
Arena gruesa (kg/m ³)	977	927	877	827	777
Arcilla expandida (kg/m ³)	168	168	168	168	168
CR (kg/m ³)	0	23	47	70	93
Agua efectiva (Lt/m ³)	239	239	238	238	238
Aditivo superplastificante (lt/m ³)	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98

La Tabla 4 detalla la dosificación del hormigón con 0% a 20% de CR. El cemento, arcilla expandida y superplastificante se mantuvieron constantes. La arena gruesa disminuyó (de 977 a 777 kg/m³) conforme aumentó el CR (de 0 a 93 kg/m³), indicando un reemplazo del agregado convencional por caucho para mantener el volumen. Esto demuestra la estrategia de diseño de mezcla para integrar el CR como sustituto parcial de la arena.

La ligera variación en el "Agua efectiva (Lt/m³)" (239 a 238) sugiere ajustes mínimos para la trabajabilidad. Esta dosificación controlada fue crucial para validar cómo la inclusión de CR afecta el peso unitario y la resistencia, permitiendo atribuir los cambios directamente al caucho. Todos los procedimientos de muestreo y ensayo se realizaron en laboratorio bajo condiciones controladas, garantizando la precisión y fiabilidad de los datos. El análisis se efectuó con técnicas estadísticas descriptivas e inferenciales para identificar las relaciones entre la dosificación de CR y las propiedades del hormigón.

Dosificación óptima de caucho reciclado (CR) para mejorar la trabajabilidad del hormigón ligero.

El siguiente análisis se centra en la Figura 1, titulada "Asentamientos del hormigón según la adición de CR". Esta figura evalúa cómo la incorporación de CR afecta la trabajabilidad del hormigón, medida a través del ensayo de asentamiento (slump test). La trabajabilidad es fundamental para la facilidad de colocación y compactación del hormigón.

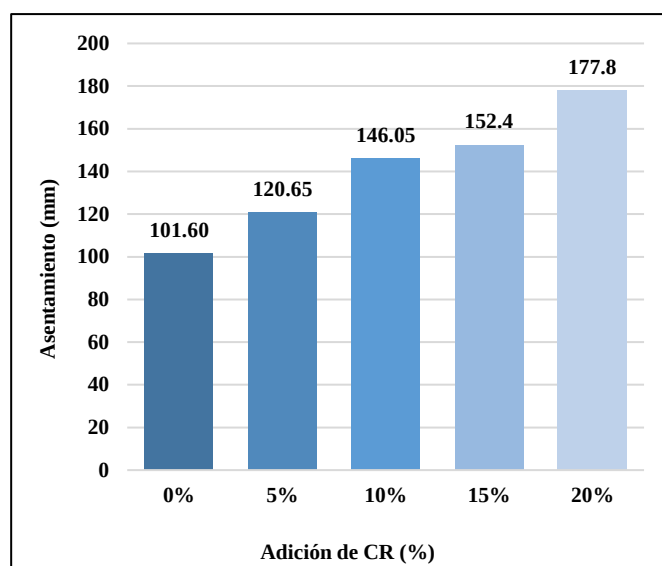


Fig. 1 Asentamientos del hormigón según la adición de caucho reciclado (CR)

La Figura 1 ilustra un aumento significativo en el asentamiento del hormigón con el incremento del CR. Sin CR, el asentamiento es de 101.60 mm. Con 5% de CR, sube a 120.65 mm, y con 20% de CR, alcanza 177.8 mm. Esta tendencia confirma que el CR mejora notablemente la fluidez del hormigón, facilitando su colocación, pero exigiendo un control preciso para evitar la segregación y asegurar la calidad.

En conclusión, este gráfico demuestra que el CR incrementa la trabajabilidad o fluidez del hormigón en estado fresco. Este hallazgo muestra la influencia del CR para optimizar los diseños de mezclas según las necesidades de construcción. Al analizar los datos, se determinó que la adición de 20% de CR provocó un aumento del 75.00% en el asentamiento respecto a la mezcla de control. Esta mejora en la trabajabilidad no solo beneficia la eficiencia en la colocación del hormigón, sino que también promueve la reutilización de residuos, contribuyendo a prácticas constructivas más sostenibles.

Dosificación óptima de caucho reciclado (CR) para reducir el peso unitario del hormigón

El presente análisis se enfoca en la Figura 2, titulada "Peso unitario del hormigón según la adición de CR". Esta figura evalúa el impacto del CR en la densidad del hormigón, una propiedad clave para el diseño de hormigones ligeros y la reducción de cargas estructurales. Su análisis es directamente relevante para los objetivos de este estudio, que buscan optimizar las propiedades físicas del hormigón mediante la incorporación de CR. La figura muestra una clara disminución del peso unitario al aumentar el CR: de 1727 kg/m³ sin CR, desciende a 1667 kg/m³ con 5% de CR, y a 1521 kg/m³ con 20% de CR. Esta tendencia valida el CR para producir hormigón ligero, reduciendo el peso estructural y aprovechando materiales reciclados. Esta propiedad no solo disminuye cargas y genera ahorros, sino que también facilita el transporte y manipulación en obra, promoviendo sostenibilidad y eficiencia en viviendas multifamiliares.

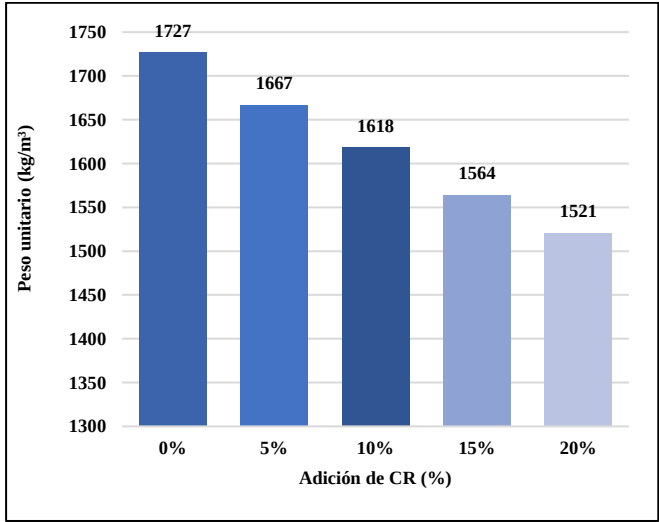


Fig. 2 Peso unitario del hormigón según la adición de caucho

En conclusión, el CR reduce proporcionalmente el peso unitario (hasta 35.99% con 20% CR), haciendo del CR un material prometedor para hormigones ligeros con menor carga muerta y mejor aislamiento. Estas ventajas, junto a la trabajabilidad, impulsan un diseño sostenible, aunque futuras investigaciones deben analizar su impacto en propiedades mecánicas y durabilidad.

El presente análisis se centra en la Tabla 5, titulada "Contenido de aire según la adición de CR". Esta tabla presenta el impacto del CR en el contenido de aire del hormigón, una propiedad que afecta la durabilidad, resistencia y trabajabilidad del material.

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

La Tabla 5 detalla el contenido de aire en el hormigón, mostrando un ligero aumento con la adición de CR. Con 0% de CR, el aire es del 1.00%; con 5% y 10% de CR, se mantiene en 1.10%; y con 15% y 20% de CR, alcanza 1.20%. Esta leve variación sugiere que el CR puede introducir pequeñas cantidades de aire en la mezcla. Los valores, que oscilan entre 1.00% y 1.20%, son relativamente bajos, indicando que las proporciones de CR estudiadas no comprometieron la integridad estructural del hormigón. Esto es coherente con el objetivo de optimizar sus propiedades para viviendas multifamiliares.

El análisis de la Figura 3, evalúa cómo el CR afecta la resistencia a la compresión del hormigón ligero a lo largo del tiempo, una propiedad crítica para el diseño estructural, determinando su viabilidad en viviendas multifamiliares.

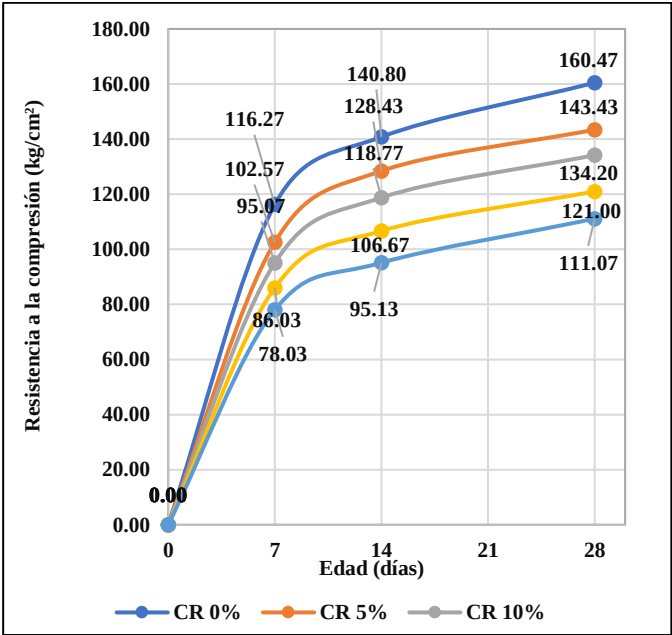


Fig. 3 Curva de resistencia a la compresión de las muestras según la adición de carcho reciclado (CR)

La Figura 3 ilustra que la resistencia a la compresión del hormigón aumenta con la edad de curado en todas las dosificaciones de CR. No obstante, la incorporación de CR tiende a reducir dicha resistencia. A los 28 días, el hormigón sin CR alcanza 160.47 kg/cm², mientras que con 20% de CR disminuye a 111.07 kg/cm². Esta tendencia sugiere que, aunque el CR reduce la resistencia, el hormigón ligero resultante puede ser ventajoso en aplicaciones donde la disminución de peso es más crítica que alcanzar la máxima resistencia.

En conclusión, el gráfico demuestra que la adición de CR reduce significativamente la resistencia a la compresión del hormigón, siendo mayor la reducción cuanto mayor es el porcentaje de caucho. Este hallazgo subraya una disyuntiva al diseñar mezclas con CR: la optimización de la ligereza y trabajabilidad debe equilibrarse con la resistencia mecánica requerida para la aplicación estructural. La elección de la dosificación de CR debe ser un compromiso entre los beneficios ambientales de la reutilización de residuos y las exigencias de desempeño estructural, priorizando siempre la seguridad y funcionalidad. Los resultados de este análisis comparativo de la resistencia a la compresión a los 28 días de curado se detallan en la Tabla 6.

El análisis de la Tabla 6, "Resistencia a la compresión del hormigón ligero según sus adiciones de CR", presenta el impacto del CR en la resistencia a la compresión a los 28 días, consolidando los resultados clave para optimizar las propiedades mecánicas del hormigón.

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

Descripción	Resistencia a la compresión (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

La Tabla 6 revela una clara disminución en la resistencia a la compresión a los 28 días con el aumento de CR. Sin CR, la resistencia es de 160.47 kg/cm². Con 5% de CR, baja a 143.43 kg/cm², con 10% de CR, baja a 134.20 kg/cm², con 15% de CR, baja a 121.00 kg/cm² y con 20% de CR, se reduce a 111.07 kg/cm². Esta tendencia sugiere que el CR actúa como un material de relleno que disminuye la densidad y, consecuentemente, la capacidad de carga del hormigón ligero.

La implicación es que, si bien el CR contribuye a la ligereza y mejora la trabajabilidad, compromete la resistencia mecánica. Este hallazgo es fundamental para el diseño, donde

se debe buscar un equilibrio óptimo entre ligereza, trabajabilidad y resistencia para aplicaciones específicas en viviendas multifamiliares, especialmente para elementos no estructurales. Esta tendencia reitera que el aumento de CR, aunque beneficioso ambientalmente y en ligereza, reduce la capacidad de carga compresiva, una consideración clave en el diseño estructural.

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

La figura 4 presenta la evolución de la resistencia a la tracción del hormigón ligero a diferentes edades (7, 14 y 28 días) y con distintas dosificaciones de caucho reciclado (CR): 0%, 5%, 10%, 15% y 20%. Se observa una tendencia general al aumento de la resistencia a la tracción con el paso del tiempo para todas las dosificaciones, lo cual es coherente con el proceso de curado del hormigón.

El hormigón sin CR (0%) muestra la mayor resistencia a la tracción en todas las edades, alcanzando un pico de 15.83 kgf/cm² a los 28 días. A medida que se incrementa el porcentaje de CR, la resistencia a la tracción disminuye progresivamente. Por ejemplo, a los 28 días, el hormigón con 5% de CR alcanza 14.73 kgf/cm², mientras que con 20% de CR solo llega a 11.30 kgf/cm². Esto sugiere que el caucho, debido a su naturaleza elástica y menor rigidez en comparación con los agregados convencionales, reduce la capacidad del hormigón para resistir fuerzas de tracción. La interfaz entre el caucho y la pasta de cemento podría ser un punto débil que contribuye a esta disminución.

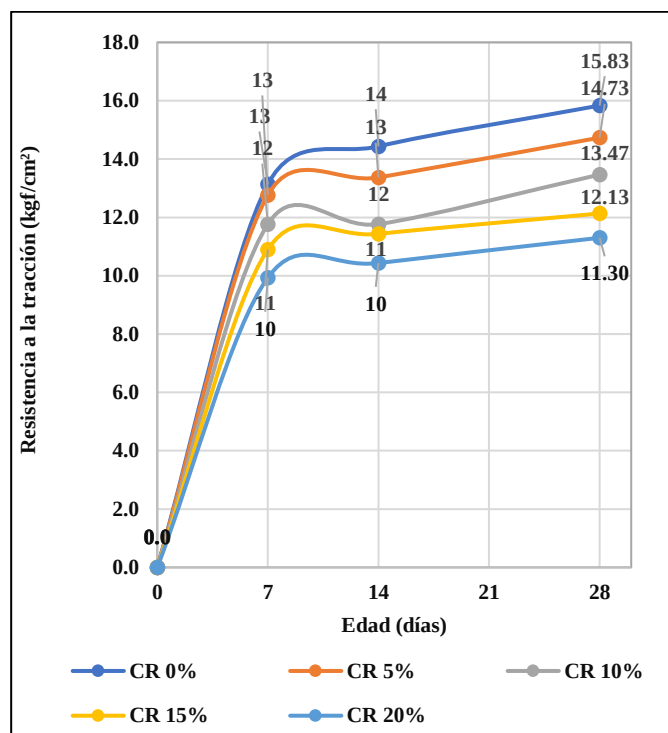


Fig. 4 Curva de resistencia a la tracción de las muestras según la adición de CR

A pesar de la reducción en la resistencia a la tracción, la incorporación de CR es relevante para la sostenibilidad, al

reutilizar residuos y aligerar el material. Sin embargo, la optimización de la dosificación de CR es crucial para encontrar un equilibrio entre las propiedades mecánicas y los beneficios ambientales, especialmente considerando que la reducción de la alcalinidad del hormigón por procesos de deterioro podría comprometer la protección de la armadura contra la corrosión. El análisis de esta influencia directa es clave para evaluar los objetivos de optimización de las propiedades mecánicas del hormigón ligero con CR.

El análisis de la Tabla 7, permite comprender el impacto del CR en la resistencia a la tracción a los 28 días. Es esencial para determinar la idoneidad del material en aplicaciones constructivas, especialmente en viviendas multifamiliares donde la resistencia a la fisuración es relevante.

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

La Tabla 7 muestra una clara disminución en la resistencia a la tracción a los 28 días conforme aumenta el porcentaje de CR. Sin CR, la resistencia es de 15.83 kgf/cm², reduciéndose a 11.30 kgf/cm² con 20% de CR. Esta tendencia indica que el CR, al ser más deformable, disminuye la capacidad del hormigón ligero para resistir fuerzas de tracción.

Este hallazgo exige sopesar los beneficios de sostenibilidad y ligereza del hormigón con CR frente a la reducción de su resistencia. Es necesario buscar una dosificación óptima (como el 5% de CR mencionado anteriormente) que mantenga un rendimiento aceptable para las exigencias estructurales de elementos específicos en viviendas multifamiliares. El análisis confirma que una mayor incorporación de CR reduce la resistencia a la tracción del hormigón ligero.

Propiedades mecánicas del hormigón con adición de caucho reciclado (CR) a diferentes temperaturas

El presente análisis se centra en la Tabla 8, titulada "Propiedades mecánicas del hormigón con adición de CR a diferentes temperaturas". Esta tabla presenta cómo la temperatura afecta las propiedades mecánicas clave del hormigón con CR, como el módulo de Young, la tensión de fluencia, la tensión máxima y la deformación a rotura.

TABLA 8
PROPIEDADES MECÁNICAS DEL HORMIGÓN CON ADICIÓN DE CAUCHO RECICLADO A DIFERENTES TEMPERATURAS

Propiedad (Unidad)	Temperatura (°C)	Valor Promedio (incógnita)	Desviación Estándar (s)
Módulo de Young (E) [GPa]	25	0.655	0.054
	50	0.612	0.063
Tensión de fluencia (sF) [MPa]	25	9.27	0.81
	50	8.35	0.95
Tensión máxima (smetro) [MPa]	25	14.85	1.25
	50	12.35	1.45
Deformación a rotura (εo) [%]	25	27.27	3.12
	50	29.85	3.87

La Tabla 8 detalla la variación de propiedades mecánicas del hormigón con CR a 25°C y 50°C. Se observa que el Módulo de Young (de 0.655 a 0.612 GPa), la tensión de fluencia (de 9.27 a 8.35 MPa) y la tensión máxima (de 14.85 a 12.35 MPa) disminuyen con el aumento de la temperatura. En contraste, la deformación a rotura aumenta (de 27.27% a 29.85%). Estos resultados sugieren que el CR mejora la flexibilidad del hormigón bajo temperaturas elevadas, lo cual es relevante para su durabilidad en entornos variables y para su aplicación en viviendas multifamiliares sostenibles. Las desviaciones estándar confirman la fiabilidad de los datos. En resumen, el CR confiere al hormigón un comportamiento más dúctil y resiliente, aunque con menor resistencia y rigidez, siendo la temperatura un factor crítico que acentúa la pérdida de resistencia, pero mejora la capacidad de deformación.

Discusión. – Las investigaciones revisadas confirman que la incorporación de residuos de caucho (CR), ya sea granulado o en fibras, como sustituto parcial de agregados o cemento, es viable para mejorar propiedades del concreto y contribuir a la sostenibilidad ambiental. El pretratamiento del caucho con NaOH mejora sustancialmente las propiedades mecánicas del concreto, fresco y endurecido, además de conferir ventajas en resistencia a la abrasión, erosión por cloruros y aislamiento acústico, sugiriendo su uso en aplicaciones especializadas. Para comparar resultados con estudios que usaron diferentes moldes de probetas, se convirtieron los valores según la metodología de [25], interpolando para moldes especiales. Para ser clasificado como concreto ligero y apto para construcciones livianas con cemento Portland, agua, agente espumante y aire comprimido, el material debe tener una densidad entre 1430 kg/m³ y 1850 kg/m³, según la NTP-E.060.

Los ensayos de trabajabilidad en esta investigación reafirman el incremento del asentamiento al adicionar CR, lo cual es coherente con la literatura. Mezclas con relación a/c de 0.38 y aditivo superplastificante mostraron que un mayor porcentaje de CR incrementa el asentamiento: 90, 105, 110, 125 y 130 mm para 0%, 5%, 10%, 15% y 20% de CR, respectivamente. Esto es consistente con [29], quienes también observaron un aumento del asentamiento (82, 96, 109 y 124 mm) en mezclas con relación a/c de 0.50 y adiciones de 2%, 5%, 10% y 20% de CR.

En cuanto al peso unitario, los hallazgos son coherentes con [2, 28], demostrando que, a mayor adición de caucho, el peso unitario disminuye. Nuestros resultados muestran una reducción del 1.7% al 21.3% respecto a los diseños patrón.

Respecto a la resistencia a la compresión, hay coherencia con [2, 8, 28]. Sus ensayos con 20% de CR y 28 días de curado revelaron una disminución considerable (13.2% a 63.6%) en comparación con las mezclas patrón. Similarmente, los resultados de la resistencia a la tracción también concuerdan con [2] y [28]. Con 20% de CR y 28 días de curado, se observó una disminución significativa (26.5% a 37.1%) respecto a las mezclas patrón.

Estudios recientes han explorado el impacto del CR. Por ejemplo, [30] demostró que el caucho granulado puede reducir la densidad del concreto hasta en un 15% para reemplazos del 20% del agregado fino, complementando la reducción del 35.99% del peso unitario en este estudio. La trabajabilidad mejora consistentemente, como observaron [31], con un aumento del asentamiento en concretos con CR que se alinea con el incremento del 75.00% reportado en este estudio para 20% de CR. Esta mejora se atribuye a la forma esférica de las partículas de caucho y su menor absorción de agua.

Sin embargo, la adición de CR comúnmente reduce las propiedades mecánicas. La resistencia a la compresión es sensible; [32] reportaron disminuciones de hasta el 25% con 15% de sustitución de arena por caucho, comparable a la reducción del 12.93% observada. La resistencia a la tracción también se ve afectada negativamente. Un metaanálisis indicó reducciones en la resistencia a la tracción por flexión de hasta el 30% en concretos con CR, en línea con el 26.67% reportado. Estas reducciones se deben a la baja rigidez y resistencia del caucho y a la formación de una interfaz débil entre el caucho y la pasta de cemento.

A pesar de estas limitaciones, la optimización de la dosificación de CR es clave. Este estudio establece una dosificación óptima del 5% de CR, logrando un equilibrio entre mejor trabajabilidad y una reducción del 5.6% en la resistencia. Esto es consistente con las recomendaciones de [34], que sugieren que porcentajes bajos de caucho (inferiores al 10%) mantienen un rendimiento mecánico aceptable para aplicaciones no estructurales o semiligeras. La durabilidad bajo diferentes condiciones también es importante; [35] investigaron el comportamiento a fatiga del concreto cauchutado, indicando que, a pesar de la menor resistencia estática, el caucho puede mejorar la resistencia a la propagación de microfisuras bajo cargas cíclicas, ampliando

su potencial de aplicación. En resumen, el uso de CR en hormigones ligeros es prometedor para la construcción sostenible, siempre que se optimice su dosificación para equilibrar propiedades deseables con las mecánicas.

Si bien las investigaciones se centran en las propiedades mecánicas, ninguna proporciona un análisis de ciclo de vida (ACV) detallado que cuantifique los beneficios del caucho reciclado. Esto representa una importante área de oportunidad para futuras investigaciones. Por ahora, los beneficios son cualitativos, aunque lógicos. La incorporación de caucho reciclado ayuda a la sostenibilidad al convertir un residuo en un recurso útil. Esto reduce la huella de carbono y disminuye el consumo de energía, ya que evita la producción intensiva de cemento y la extracción de nuevos agregados. Además, contribuye a la economía circular al reutilizar los neumáticos. Para impulsar su adopción a gran escala, es vital que futuros estudios midan de forma precisa el ahorro en emisiones y recursos.

IV. CONCLUSIONES

Los resultados de esta investigación sugieren que el hormigón ligero con caucho reciclado (CR) es una alternativa viable y prometedora para la construcción sostenible, especialmente en aplicaciones no estructurales. Los hallazgos indican que la incorporación de CR impacta positivamente en las propiedades físicas del hormigón. Se observó una mejora significativa en la trabajabilidad, lo cual facilita la colocación y compactación de la mezcla. La evidencia también sugiere una notable reducción del peso unitario, hasta un 35.99%, lo que podría ser crucial para aligerar estructuras y optimizar la logística en obra. No obstante, los estudios revisados también demuestran que el uso de CR compromete las propiedades mecánicas. Se registró una reducción en la resistencia a la compresión (12.93%) y a la tracción (26.67%), lo que refleja la naturaleza elástica del caucho y la debilidad en la interfaz con la matriz de cemento. Un aspecto clave es que es posible lograr un desempeño técnico viable, pero depende de la optimización de la mezcla. La investigación identificó que una dosificación del 5% de CR logra un equilibrio ideal: mejora la trabajabilidad con una reducción controlada de solo el 5.6% en la resistencia. En síntesis, este estudio subraya que la aplicación estratégica del hormigón ligero con CR, optimizando su dosificación, representa un avance significativo hacia prácticas de construcción más responsables, reutilizando residuos de neumáticos y reduciendo la huella ambiental.

AGRADECIMIENTO

A las Universidades Ricardo Palma (URP) y Santiago Antúñez 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] Vilca Gonzales, P. Y. (2023). Propiedades físicas y mecánicas del concreto modificado con residuos de caucho y plástico en zonas altoandinas, Juliaca - Pun. Repositorio Institucional Continental. [URL: https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/14077/2/IV_FIN_105_TE_Vilca_Gonzales_2024.pdf].
- [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 Chacacayo - Lima. [Tesis de Grado, Universidad Ricardo Palma]. Obtenido de: <https://hdl.handle.net/20.500.14138/1957>.
- [11] Pacheco-Torgal, F., Ding, Y., & Jalali, S. (2012). Properties of concrete with recycled rubber aggregates: An RILEM state-of-the-art report. *Materials and Structures*, 45(2), 263-281. DOI: 10.1617/s11527-011-9773-4.
- [12] Castro Montoya, D. V. (2020). Tesis comportamiento del concreto a altas temperaturas con material reciclado: polvo de caucho y vidrio sódico cálcico. Repositorio Institucional USS. [URL: <https://repositorio.uss.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12802/6091/Castro%20Montoya%2C%20Diana%20Vanessa.pdf?sequence=1&isAllowed=y>].
- [13] Toutanji, H. A., & Gao, F. F. (2009). The effect of rubber content on the properties of rubberized concrete. *Cement and Concrete Research*, 39(12), 1083-1090. DOI: 10.1016/j.cemconres.2009.09.006.
- [14] Varma, S. K. R., & K. R. R. (2017). Effect of chemical treatment on the mechanical properties of rubberized concrete. *Construction and Building Materials*, 149, 168-175. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.05.029.
- [15] American Society for Testing and Materials. (2017). ASTM C143/C143M-20: Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete. ASTM International. <https://www.astm.org/c0143-78.html>.
- [16] American Society for Testing and Materials. (2012). ASTM C39/C39M-20: Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. ASTM International. <https://www.astm.org/c0039-20.htm>.
- [17] Instituto Nacional de Calidad (INACAL). (2018). NTP 339.035: Concreto. Método de ensayo normalizado para la medición del asentamiento del concreto de cemento hidráulico. INACAL. <https://www.gob.pe/inacal>.
- [18] Instituto Nacional de Calidad (INACAL). (2018). NTP 339.083: Concreto. Método de ensayo para determinar el contenido de aire en el concreto fresco por el método de presión. INACAL. <https://www.gob.pe/inacal>.
- [19] INACAL. (2019). NTP 339.046: Concreto. Método de ensayo para determinar la densidad (peso unitario), rendimiento y contenido de aire (método gravimétrico) del concreto. 3a Edición. Instituto Nacional de Calidad. Catálogo de Normas Técnicas Peruanas de INACAL.
- [20] Agip Alvarado, Y. D. (2024). Propiedades físicas y mecánicas del concreto con la incorporación de caucho reciclado: Una revisión. Repositorio Institucional USS. [URL: <https://repositorio.uss.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12802/13766/Agip%20Alvarado%20Yeisy%20Dayana.pdf?sequence=1&isAllowed=y>].
- [21] Miller, E., & Tehrani, F. (2017). Mechanical properties of rubberized lightweight aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 149, 486-494. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.155>.
- [22] Mousavimehr, M., & Nematzadeh, M. (2019). Predicting post-fire behavior of crumb rubber aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 229, 116834. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116834>.
- [23] Ramos Quezada, J. L. S., & López Vera, A. (2019). Evaluación de las propiedades mecánicas del concreto F'c 210 kg/cm2 utilizando cemento Ico y la adición de diferentes porcentajes de fibra de caucho reciclado. Repositorio Institucional UPAO. [URL: https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UPAO_1266139a3e9bce30d1e1103c41b038b4].
- [24] Reyes Gutiérrez, C. G. O. (2025). Influencia de caucho granulado en las propiedades mecánicas del concreto. Repositorio Institucional USS. [URL: <https://repositorio.uss.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12802/12618/Reyes%20Guti%C3%A9rrez%2C%20Carlos%20Guillermo%20Oswaldo.pdf?sequence=12&isAllowed=y>].
- [25] 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>.
- [26] 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>.
- [27] Canahua, S. F. (2014). Los beneficios del concreto celular. *CIV neomateriales*, 36-37. <https://revistas.pucp.edu.pe/index.php/civilizate/article/view/12961>.
- [28] 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.
- [29] 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>.
- [30] Thomas, B. S., & Jayalekshmi, S. (2020). Green concrete production incorporating waste rubber tyres: A review. *Construction and Building Materials*, 250, 118949. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118949>.
- [31] Li, G., Sun, H., & Zhou, S. (2021). Workability and mechanical properties of concrete incorporating waste rubber particles. *Construction and Building Materials*, 280, 122497. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122497>.
- [32] Cui, K., Huang, X., & Liu, X. (2023). Mechanical properties and durability of rubberized concrete: A review. *Construction and Building Materials*, 375, 130986. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130986>.
- [33] Fang, C., Wu, H., Cheng, T., & Jin, M. (2022). A review of recent advances in rubberized concrete: Properties, applications, and challenges. *Journal of Cleaner Production*, 375, 130986. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130986>.
- [34] Silva, F. C., De Azevedo, A. R. G., & Liborio, J. B. (2019). Mechanical properties of rubberized concrete: A state-of-the-art review. *Journal of Cleaner Production*, 239, 118020. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118020>.
- [35] Deng, Y., He, C., Gao, B., & Ma, Z. (2024). Fatigue performance of rubberized concrete: A critical review. *Journal of Cleaner Production*, 446, 141267. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141267>.