

Physical and Mechanical Properties of Sustainable Bricks with Recycled Rubber for Load-Bearing Walls in Confined Masonry

Alexandra Cecilia Quispe Turpo¹; Judith Yanina Chuctaya Kana²

^{1,2}Universidad Tecnológica del Perú, Perú, U19218864@utp.edu.pe, U19100741@ utp.edu.pe

ABSTRACT: *This study evaluates the feasibility of bricks with recycled rubber for use in load-bearing walls of confined masonry in Arequipa, Peru. Proportions of 3%, 8%, and 13% rubber powder and 5%, 15%, and 25% rubber granules were incorporated into a clay mixture. The bricks were manufactured following current regulations and subjected to tests for dimensional variation, warping, water absorption, and compressive strength, in accordance with NTP 339.613 and NTP 339.604 standards. The results indicate that recycled rubber increases porosity, enhancing thermal and acoustic insulation but reducing compressive strength. Only bricks with 3% rubber powder and 5% granules met the minimum requirement of 130 kg/cm². All bricks complied with the regulatory limits for dimensional variation, warping, and water absorption ($\leq 22\%$). It is concluded that bricks with low proportions of recycled rubber offer adequate structural performance and promote sustainability by reusing discarded tires. However, higher rubber content compromises structural capacity. The economic analysis supports their feasibility as a promising alternative for more sustainable construction.*

Keywords: *Brick, load-bearing wall, recycled rubber, mechanical properties, physical properties.*

Propiedades físicas y mecánicas de ladrillos sostenibles con caucho reciclado para muros portantes en albañilería confinada

Alexandra Cecilia Quispe Turpo¹; Judith Yanina Chuctaya Kana²

^{1,2}Universidad Tecnológica del Perú, Perú, U19218864@utp.edu.pe, U19100741@utp.edu.pe

Resumen: Este estudio evalúa la viabilidad de ladrillos con caucho reciclado para su uso en muros portantes de albañilería confinada en Arequipa, Perú. Se incorporaron 3%, 8% y 13% de caucho en polvo y 5%, 15% y 25% de granulado en una mezcla con arcilla. Los ladrillos fueron fabricados siguiendo normativas vigentes y sometidos a ensayos de variación dimensional, alabeo, absorción de agua y resistencia a la compresión, conforme a las normas NTP 339.613 y NTP 339.604. Los resultados indican que el caucho reciclado aumenta la porosidad, mejorando el aislamiento térmico y acústico, pero reduciendo la resistencia a la compresión. Solo los ladrillos con 3% de polvo y 5% de granulado alcanzaron el requisito mínimo de 130 kg/cm². Todos cumplieron con los límites normativos de variación dimensional, alabeo y absorción de agua ($\leq 22\%$). Se concluye que ladrillos con bajas proporciones de caucho reciclado ofrecen un desempeño estructural adecuado y promueven la sostenibilidad mediante la reutilización de neumáticos desechados. No obstante, mayores contenidos de caucho comprometen la capacidad estructural. El análisis económico respalda su viabilidad como una alternativa prometedora para una construcción más sostenible.

Palabras clave: Ladrillo, muro portante, caucho reciclado, propiedades mecánicas, propiedades físicas.

I. INTRODUCCIÓN

La construcción emplea materiales cuya obtención y procesamiento generan emisiones de gases de efecto invernadero, como los agregados y el cemento, lo que representa una preocupación para los países miembros de la COP21 (Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático) [1]. En este contexto, los ladrillos fabricados con materiales reciclados han surgido como una alternativa viable. En particular, el uso de caucho reciclado en la fabricación de ladrillos ha demostrado contribuir a la sostenibilidad en la construcción, al reducir el consumo de recursos naturales y aprovechar residuos industriales [2,3].

Diversos estudios han promovido el empleo de residuos no biodegradables, como neumáticos desechados y tereftalato de polietileno (PET), debido a sus beneficios en la durabilidad, flexibilidad y resistencia a la compresión [4,5]. Sin embargo, en la ciudad de Arequipa, Perú, donde la albañilería confinada es una de las técnicas constructivas más utilizadas, especialmente en edificaciones autoconstruidas, la mayoría de los ladrillos artesanales presentan propiedades físico-mecánicas que no cumplen con las exigencias normativas. En contraste, los ladrillos industrializados ofrecen mayor resistencia, lo que los hace

más adecuados para soportar cargas a compresión y cumplir con los estándares de calidad.

Estudios previos han abordado la fabricación de ladrillos ecológicos a partir de diversos materiales reciclados, como suelo limo-arenoso, virutas, papel y caucho de neumáticos, encontrando que estos materiales no solo mejoran la resistencia estructural y la capacidad de deformación en comparación con los ladrillos tradicionales, sino que también reducen costos y generan un impacto ambiental positivo [6,7]. En particular, los ladrillos elaborados con caucho reciclado han demostrado ser una solución prometedora para la construcción sostenible, especialmente en el contexto peruano, donde el reciclaje de neumáticos se perfila como una alternativa viable para aplicaciones constructivas [8,9].

Este estudio se enmarca en la búsqueda de soluciones constructivas que reduzcan el impacto ambiental y mejoren las características técnicas de los materiales utilizados en la edificación, alineándose con los objetivos de sostenibilidad establecidos por acuerdos internacionales [10,11]. A través de la evaluación de las propiedades físicas y mecánicas de estos ladrillos ecológicos, se busca ofrecer una alternativa factible para la construcción de muros portantes en albañilería confinada, asegurando el cumplimiento de los estándares de resistencia, viabilidad económica y responsabilidad ambiental [12-14]. En este contexto, surge la necesidad de analizar las propiedades físico-mecánicas de unidades de albañilería fabricadas con caucho reciclado en forma de granulado y polvo, con el fin de determinar su idoneidad estructural en muros portantes de albañilería confinada. Para ello, se evaluará el cumplimiento de las normas técnicas de construcción, incluyendo la Norma Técnica E.070 de albañilería y las normativas NTP 339.613 y NTP 339.604.

II. METODOLOGÍA

A. ELABORACION DE ECOLADRILLO

Para la elaboración de los ladrillos, se realizó inicialmente la selección del caucho reciclado en dos presentaciones: en polvo y granulado. El caucho granulado fue sometido a un análisis granulométrico mediante tamices de diferentes diámetros (N°3/8, N°4, N°8, N°10, N°16, N°30, N°40,

N°50, N°80, N°100 y N°200) con el fin de determinar su distribución de tamaños de partículas. También se utilizó arcilla, la cual fue adquirida de proveedores locales, proveniente de canteras ubicadas en distintos distritos de la provincia de Arequipa.

Posteriormente, se definieron dos tratamientos para la fabricación de los ladrillos:

Ladrillos con caucho en polvo, con dosificación de: 3%, 8% y 13% y ladrillos con granulado de caucho reciclado, con dosificación de: 5%, 15% y 25%. Estas proporciones fueron establecidas en función de la cantidad de arcilla y permitieron evaluar el impacto del caucho reciclado en las propiedades del material final.

A continuación, se llevó a cabo el proceso de mezclado y homogenización de la arcilla y el caucho reciclado, considerando dos niveles de contenido de agua: 22% y 32%, lo que equivale aproximadamente 0.3 - 0.5 litros para la mezcla y moldeo por cada unidad de mezcla. Esta humedad fue esencial para garantizar la plasticidad adecuada del material.

Luego, la mezcla fue procesada en una extrusora de ladrillos BERTAN EB 350, proporcionada por la empresa ladrillera, asegurando una distribución uniforme de los componentes antes del moldeo y cocción. Una vez que la mezcla esté homogénea se procedió con el moldeo de los ladrillos, los cuales fueron transportados mediante fajas hacia la cortadora BERTAN EB 350, equipada con un sistema de sensores de alta precisión. Este proceso garantizó un corte uniforme, asegurando que todos los ladrillos tuvieran las mismas dimensiones. Luego, los ladrillos fueron trasladados a la zona de secado, donde permanecieron 14 días. Esta fase fue fundamental para eliminar la humedad residual, así como para prevenir fisuras y deformaciones durante la cocción.”

Finalmente, se llevó a cabo la cocción en un horno eléctrico tipo HOFFMAN, operando a temperaturas entre 900°C y 1000°C. Esto permitió un control del tiempo de quema y la temperatura, optimizando la eficiencia del proceso y reduciendo las emisiones contaminantes. La cocción no solo garantizó la durabilidad del ladrillo, sino que también mejoró su resistencia a la intemperie y cargas mecánicas, asegurando su desempeño estructural a lo largo del tiempo

B. PROPIEDADES FÍSICO-MECANICAS DEL ECOLADRILLO

El ensayo de Variación Dimensional determina el porcentaje de variación de las dimensiones del ladrillo (largo, ancho y alto) con respecto a las medidas de diseño. Para ello, se aplica la siguiente ecuación

$$V(\%) = 100 \frac{(Medida\ de\ diseño - Medida\ promedio\ del\ ladrillo)}{Medida\ de\ diseño} \#(1)$$

Los resultados obtenidos se compararon con los valores de tolerancia dimensional especificados en las normas NTP 339.613 y NTP 339.604, verificando el cumplimiento de los requisitos establecidos para la fabricación de ladrillos.

Otra propiedad física analizada fue el ensayo de alabeo la cual muestra la deformación o curvatura de los ladrillos, que puede afectar su correcta colocación y alineación en el muro, se evaluó siguiendo la norma NTP 399.604, para ello, se colocó en una base plana los ladrillos y se midió la distancia máxima entre el ladrillo y la superficie para evaluar la magnitud del alabeo.

Finalmente, para el porcentaje de absorción de agua, se siguieron las normas NTP 399.604 y NTP 399.613. y para el cálculo del se empleó la siguiente ecuación

$$Absorcion(\%) = \frac{Peso\ mojado - Peso\ seco}{Peso\ seco} \times 100 \#(2)$$

Una de las propiedades mecánicas analizadas fue la resistencia a la compresión siguiendo las normas NTP 399.613 y NTP 339.604. Este ensayo consta de la medición del área de la sección transversal (A) de las caras sometidas a la carga (en m² o cm²), luego la resistencia a la compresión $f'c$ utilizando la formula

$$f'c = \frac{C}{A} \#(3)$$

donde C es la carga de ruptura (en N o Kgf), mientras que A representa al área de la sección transversal del ladrillo (en m² o cm²)

C. ANALISIS DE PRECIOS UNITARIOS

Este paso es esencial para la viabilidad económica del proyecto de integración de caucho reciclado en la fabricación de ladrillos. La producción de un ladrillo convencional tiene costos relativamente bien establecidos, pero la adición de caucho reciclado puede alterar el costo de los insumos y el proceso de producción. Por lo tanto, se realizaría un análisis de precios unitarios de los costos de producción de un ladrillo fabricado con caucho reciclado. Este análisis incluye principalmente los costos directos de los materiales. Si el costo es competitivo y los ladrillos cumplen con los estándares estructurales, la fabricación de ladrillos con caucho reciclado podría ser una opción económicamente viable que también contribuye a la sostenibilidad, al reducir el impacto ambiental de los neumáticos desechados [11].

III. RESULTADOS

A. ELABORACIÓN DE ECOLADRILLOS

1) Análisis Granulométrico de GCR

La Tabla I muestra el análisis granulométrico del caucho granulado, evidenciando la distribución del tamaño de partículas. Para la fabricación del ecoladrillo, se seleccionó el Tamiz N°8, que corresponde a partículas con un diámetro de aproximadamente 2.36 mm, con un porcentaje de retención del 3.7%, un porcentaje total retenido del 98.6% y un porcentaje total pasante del 1.4% (ver Fig. 1). El tamaño de partícula seleccionado, permitió una mejor integración en la mezcla, favoreciendo la compactación sin generar una textura excesivamente rugosa. Además, contribuye a mejorar propiedades del ladrillo, como la absorción de impactos y la reducción de fragilidad, sin comprometer significativamente la resistencia mecánica.

TABLA I
Granulometría por Tamizado del Caucho granulado.

TAMIZ	Diametro (mm)	Wret+T(g)	W RET.(g)	%Wret	% Total Retenido	% Total Pasante
5"	127.00					
4"	101.60					
3 1/2"	88.90					
3"	76.20					
2 1/2"	63.50					
2"	50.80					
1 1/2"	38.10					
1"	25.40					
3/4"	19.10					
1/2"	12.70					
3/8"	9.52			0.0	0.0	100.0
N°4	4.760	98.8	8.4	3.7	3.7	96.2
N°8	2.380	106.9	16.5	7.3	11.1	88.9
N°10	2.000	106.0	15.6	6.9	18.0	82.0
N°16	1.190	122.5	32.1	14.2	32.2	67.7
N°30	0.590	138.8	48.4	21.5	53.7	46.3
N°40	0.425	134.0	43.6	19.3	73.0	26.9
N°50	0.300	119.0	28.6	12.7	85.7	14.3
N°80	0.180	115.6	25.2	11.2	96.9	3.1
N°100	0.150	93.9	3.5	1.6	98.4	1.5
N°200	0.074	93.3	2.9	1.3	99.7	0.2
Fondo					100.0	0

Por otro lado, las partículas más grandes podrían afectar la capacidad de conformado y generar puntos débiles en la estructura del ladrillo, mientras que partículas más pequeñas podrían alterar la porosidad y la absorción de agua. Asimismo, este rango de tamaño influye en la contracción y estabilidad dimensional del ladrillo durante las etapas de secado y cocción, asegurando una mayor uniformidad en el producto final.

El rango granulométrico seleccionado (Tamiz N° 8, 2.36 mm) fue adecuado para integrar el caucho en la mezcla sin alterar la trabajabilidad. Esto concuerda con los hallazgos de quienes señalaron que el tamaño de partícula fino mejora la compacidad y reduce defectos internos en el concreto con caucho [4]. Sin embargo, a diferencia de otros estudios donde se emplearon granulometrías mixtas, concentrándose en un solo tamaño, lo cual el control del proceso, logrando limitar de comportamiento del ladrillo en condiciones reales [8].

1) Dosificación de GCR Y CP

En este proceso de dosificación para la elaboración del ladrillo se implementó arcilla y Granulado de caucho reciclado (Fig.1(a)), arcilla y caucho en polvo (Fig.1(b)) en ambos casos de acuerdo al porcentaje del caucho.

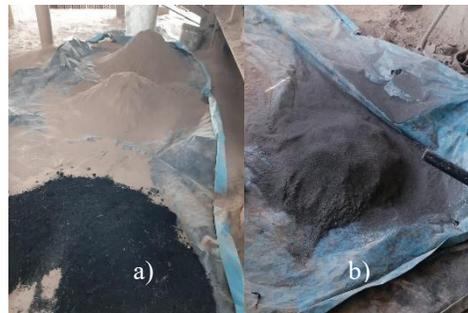


Fig.1 a) Dosificación de GCR, b) Dosificación de CP.

2) Depósito de Materia Prima y Humidificación

En este proceso de almacenamiento, se humidifico según la norma, para asegurar que todo el material cuente con las mismas características físicas. Esto fue necesaria para el moldeado y evitar la presencia de vacíos en los ecoladrillos que esto debilita su resistencia (ver Fig. 2).



Fig. 2: Depósito de Materia Prima.

3) Homogenización

Se realizó la homogenización y humedecimiento de arcilla para obtener una consistencia adecuada para la elaboración de los ladrillos y asegurar una distribución equitativa de los materiales (como arcilla, agua y aditivos, como caucho reciclado), evitando la presencia de poros que puedan comprometer su resistencia o durabilidad (ver Fig.3).



Fig. 3. Homogeneización de Material en Planta.

4) Moldeado y Secado

Este proceso se realizó la compactación de la mezcla con un molde que permitiera alcanzar las medidas deseadas, referido a un ladrillo comercial mecanizado para obtener resultados requeridos en el ensayo de variación dimensional (ver Fig.4 (a)). El proceso de secado tardó dos semanas, ya que tarda en la evaporación de agua agregada en la materia prima, y al pasar los días se observa que los ladrillos toman un color oscuro y claro de acuerdo al porcentaje de caucho (Fig.4(b))



Fig.4 a) Proceso de Moldeado, b) Proceso de Secado.

5) Horneado

Después del proceso del secado a temperatura ambiente por 14 días, se realiza el proceso de cocción a temperatura aproximada de 900°C y 1000°C. En esta fase ocurre la vitrificación, es decir, que la materia prima y los cauchos sufren cambios físicos y químicos. Así como la temperatura es importante el enfriamiento es vital para asegurar que los ladrillos cumplan con los estándares requeridos (ver Fig.5).



Fig.5 Cocción y Enfriamiento.

B. PROPIEDADES FISICAS DE ECOLADRILLO (CP Y GCR)

Los ladrillos fabricados con 3 proporciones con caucho en polvo presentan variaciones notables en su color y no presentan porosidad. El ladrillo de la Fig.6(a) con un 3% de polvo de caucho y un 97% de materia prima muestra un tono naranja claro, en el caso de la Fig.6(b), el ladrillo con un 8% de caucho y un 92% de materia prima, el color es naranja intermedio. Finalmente, en la Fig.6(c), el ladrillo que contiene un 13% de polvo de caucho y un 85% de arcilla presenta un tono naranja oscuro, a medida que aumenta el porcentaje de caucho reciclado en la mezcla, el color del ladrillo tiende a oscurecer, mostrando una gama de tonalidades que aporta una apariencia visual distintiva con variaciones en sus matices.

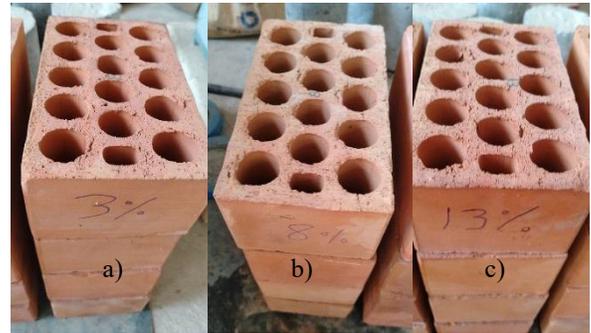


Fig.6 a) Ecoladrillo con 3% CP, b) Ecoladrillo con 8% CP, c) Ecoladrillo con 13%CP.

Los ladrillos fabricados con granulado de caucho reciclado en proporciones de 5%, 15% y 25% presentan variaciones notables en su color, que va de tonos más claros a más oscuros a medida que aumenta el porcentaje de caucho. Además, estos ladrillos exhiben manchas oscuras en su superficie, lo que muestra la presencia de agregados y una mayor concentración de caucho en ciertas áreas que indica una alta porosidad en su estructura, con pequeños huecos visibles que contribuyen a reducir el peso del ladrillo y mejorar su capacidad de aislamiento térmico y acústico (ver Fig.7).



Fig.7 a) Ecoladrillo con 5% GCR, b) Ecoladrillo con 15% GCR, c) Ecoladrillo con 25% GCR.

El ensayo de variación dimensional y alabeo realizado en este estudio, tuvieron similitud a la inclusión el caucho en la mezcla puede aumentar la absorción de agua, un comportamiento que consiste en el presente estudio. A

mayor adición de caucho reciclado se observó el aumento de porosidad y variación dimensional asociada a los ecoladrillos así como se puede observar en otras investigaciones [7,8].

C. PROPIEDADES MECANICAS DE ECOLADRILLO (GCR)

1) Ensayo de Variación Dimensional

Los resultados obtenidos, correspondientes a las variaciones en el contenido de caucho en polvo (CP) al 3% de dosificación con 0.17 cm de variación de largo, 0.4 cm de ancho y -0.03 cm de alto, de la dosificación de 8% con variación de 0.07 cm de largo, 0.31 cm de ancho y -0.01 cm de alto y de dosificación al 13% con 0.06 cm de largo, 0.37 cm de ancho y -0.15 cm de alto. Se presenta en la Tabla II que las variaciones de cada porcentaje están cumpliendo con lo estipulado de acuerdo a la Norma NTP 399.604.

Tabla II
Ensayo de Variación Dimensional de CP

Código de muestra	LARGO			ANCHO			ALTO		
	Largo(cm)	Variación(cm)	Variación (%)	Ancho(cm)	Variación(cm)	Variación (%)	Alto(cm)	Variación(cm)	Variación (%)
G-3	23.83	0.17	0.71	12.6	0.4	3.08	9.03	-0.03	-0.33
G-8	23.93	0.07	0.29	12.69	0.31	2.38	9.01	-0.01	-0.11
G-13	23.94	0.06	0.25	12.63	0.37	2.85	9.15	-0.15	-1.67

Con respecto a los ecoladrillos elaborados con granulado de caucho reciclado (GCR) al 5% de dosificación tienen una variación 0.10 cm de largo, 0.29 cm de ancho y 0.00 de alto, 15% de dosificación con -0.14 cm de largo, 0.12 cm de ancho, -0.01 cm de alto, finalmente el 25% con -0.21 cm de largo, 0.20 cm de ancho y -0.11 cm de alto, si está dentro de los estándares de la Norma NTP 399.613 y 399.604. Esto garantiza que los ecoladrillos, como se observa en la Tabla III, poseen dimensiones consistentes y dentro de los límites permitidos, asegurando su calidad y adaptabilidad para el uso previsto en la construcción. Además, este ensayo confirma que los ecoladrillos son aptos.

Tabla III
Ensayo de Variación Dimensional de GCR

Código de muestra	LARGO			ANCHO			ALTO		
	Largo(cm)	Variación(cm)	Variación (%)	Ancho(cm)	Variación(cm)	Variación (%)	Alto(cm)	Variación(cm)	Variación (%)
G-5	23.90	0.10	0.10	12.71	0.29	2.23	9.00	0.00	0.00
G-15	24.14	-0.14	-0.57	12.88	0.12	0.92	9.01	-0.01	-0.11
G-25	24.21	-0.21	-0.89	12.8	0.20	1.54	9.11	-0.11	-1.22

2) Ensayo de Alabeo

Según los datos obtenidos, las medidas se comparan con los límites de alabeo permitidos por la Norma NTP 399.613. Si el alabeo excede estos límites, el lote de ladrillos puede considerarse defectuoso. En la Tabla IV, se observa los datos obtenidos con caucho en polvo (CP) de 3% con 0.64 mm de alabeo, 8% con 0.58 mm y 13% con 0.36 mm, cumpliendo con los estándares mínimas que si están de acuerdo a la norma mencionada.

Tabla IV
Ensayo de Alabeo CP

Código de muestra	Cara superior(mm)		Cara inferior(mm)		Alabeo
	Cóncavo	Convexo	Concavo	Convexo	
G-3	0.75	0.00	1.56	0.25	0.64
G-8	1.19	0.00	1.13	0.00	0.58
G-13	0.56	0.00	0.63	0.25	0.36

Por otro lado, se observa los datos obtenidos en la Tabla V de granulado de caucho reciclado (GCR), el 5% resulto con 0.28 mm de alabeo, 15% con 0.48 mm y 25% con 0.50 mm, de la misma manera se encuentran dentro de los límites mínimos de la norma ya que el máximo es de 4 mm.

Tabla V
Ensayo de Alabeo GCR

Código de muestra	Cara superior(mm)		Cara inferior(mm)		Alabeo
	Cóncavo	Convexo	Concavo	Convexo	
G-5	0.38	0.38	0.25	0.13	0.28
G-15	0.31	0.75	0.38	0.50	0.48
G-25	0.75	0.25	0.25	0.75	0.50

3) Ensayo De Absorción

Los ensayos de absorción consistieron en sumergir las muestras en agua durante 24 horas, se realizaron según lo especificado en las normas NTP 399.604 y NTP 399.613, las cuales establecieron los procedimientos y límites para determinar la cantidad de agua que pueden absorber los ladrillos.

Los resultados de la Tabla VI mostraron que los ecoladrillos CP con una dosis del 3% obtuvo 15.99 de absorción, 8% con 16.17 y 13% con 17.04 de absorción, cumplieron con los requisitos establecidos, manteniéndose dentro del límite permitido. Esto evidencio que, a mayor absorción de agua, el ladrillo presenta mayor porosidad, lo que compromete la reducción de su resistencia y lo hace menos adecuados para su uso en muros portantes, ya que no superan límite máximo de 22%. Por lo tanto, es importante controlar la porosidad para garantizar tanto la calidad como la seguridad estructural de los ladrillos en aplicaciones destinada a muros portantes.

Tabla VI
Ensayo de Absorción CP

Código de Testigo	Peso seco(gr)	Peso Saturado(gr)	Absorción(%)
G-03	3266	3777	15.99
G-08	3205	3723	16.17
G-13	3201	3746	17.04

Por otro lado, en la Tabla VII, los ecoladrillos GCR que contienen una dosificación del 5%, resultó con 17.59 de absorción, 15% con 18.93 y 25% con 19.22 de absorción como se observa en la tabla cumplen con los parámetros establecidos, ya que presentan la porosidad adecuada para

garantizar con su función estructural. Esto se debe a que una absorción superior a 22% podría comprometer su resistencia, durabilidad y desempeño frente a diversas condiciones ambientales.

Tabla VII
Ensayo de Absorción GCR

Código de Testigo	Peso seco(gr)	Peso Saturado(gr)	Absorción(%)
G-05	3149	3703	17.59
G-15	2944	3502	18.93
G-25	2996	3571	19.22

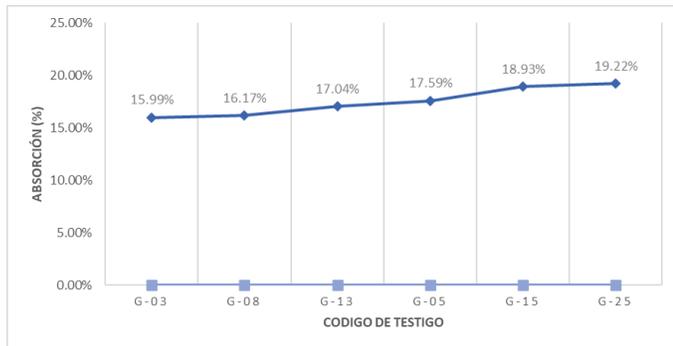


Fig. 8 Ensayo de Absorción de Ecoladrillo GCR Y CP.

En la Fig. 8 se observa que mientras incremento el caucho aumento proporcionalmente el porcentaje de absorción.

En definitiva, los resultados de ecoladrillos con caucho en polvo con un valor de 17.94% y 19.22% para granulado, los hallazgos de los bloques con partículas PET alcanzaron una absorción de agua de 21.4 hasta 23.6%. Por lo tanto, se concluyó que los ecoladrillos con caucho presentan mejor desempeño comparativo sobre los elaborados con PET. [5]

4) Ensayo De Resistencia a Compresión

La determinación de la resistencia a la compresión en caso de la unidad de albañilería, la porosidad, textura y perfil angular son los que influye en la resistencia a la compresión del ladrillo ecológico a base de caucho reciclado y caucho en polvo. Este ensayo se realizó según la NTP 399.613 y NTP 399.604, implementando equipo de ensayo manual LM-02.

Las muestras de caucho en polvo con las primeras cantidades de dosificaciones que se presentan en la Tabla VIII. Se observó que no todas las unidades cumplen con los parámetros establecidos para un ladrillo Tipo IV, ya que según la normativa el valor mínimo de resistencia a la compresión requerido es de 130 kg/cm². En este sentido, únicamente la muestra con una dosificación del 3% cumple con los estándares exigidos, alcanzando un esfuerzo a compresión de 131.3 kg/cm² por área bruta. Por el contrario, las muestras con 8% y 13% de caucho reciclado, que

presentan resistencias de 129.6 kg/cm² y 128 kg/cm² por área bruta, respectivamente, no alcanzan el valor mínimo establecido, ya que su resistencia a la compresión es inferior a lo requerido.

El rango empleado en esta investigación se alinea con los estudios previos. Los cuales concluyeron que al aumentar la adición del caucho la resistencia a la compresión disminuye, lo que también fue observado en [1,2].

Tabla VIII
Ensayo de Resistencia a Compresión CP

Código de Testigo	Largo completo (cm)	Ancho completo (cm)	Area Bruta (cm ²)	Carga Máxima (kg)	Esfuerzo Compresion (Área Bruta) (kg/cm ²)
G-03	23.95	12.7	304	39928.25	131.3
G-08	23.70	12.7	301	38994.3	129.6
G-13	23.98	12.7	304	39198.89	128.7

Las muestras con granulado de caucho reciclado (GCR) de las siguientes cantidades de dosificación, cuyos valores se presentan en la Tabla IX, muestran que solo la dosificación del 5% alcanza una resistencia de 130.2 kg/cm² por área bruta, cumpliendo con los estándares establecidos. En contraste, las muestras con 15% y 25% de GCR, que presentan resistencias de 126.7 kg/cm² y 127.1 kg/cm² por área bruta, respectivamente, no cumplen con los parámetros exigidos para un ladrillo Tipo IV, ya que sus valores de resistencia son inferiores al mínimo requerido para este tipo de unidad.

Tabla IX
Ensayo de Resistencia a Compresión GCR

Código de Testigo	Largo completo (cm)	Ancho completo (cm)	Area Bruta (cm ²)	Carga Máxima (kg)	Esfuerzo Compresion (Área Bruta) (kg/cm ²)
G-05	24.00	12.8	307	39985.15	130.2
G-15	23.93	12.9	309	39100.33	126.7
G-25	23.48	12.9	303	38495.95	127.1

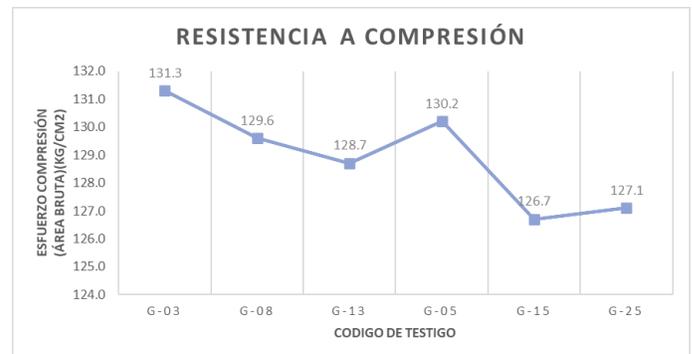


Fig. 9. Resistencia a Compresión de Ecoladrillo CP Y GCR

Cabe destacar que en la Fig. 9 se observa que los menores porcentajes de adición de 3% y 5% tuvieron una resistencia más alta en comparación con los demás porcentajes.

En cuanto a las propiedades mecánicas, el ladrillo ecológico elaborado con suelo limo arenoso, cemento, viruta y papel

presentó una resistencia a la compresión de 1.5 MPa (15.29 kg/cm² por área bruta), siendo inferior a la de los ladrillos tradicionales. En contraste, la mayor resistencia obtenida en la presente investigación correspondió a la muestra con un 3% de adición de caucho, alcanzando 12.88 MPa (131.3 kg/cm² por área bruta) [2]. Algunas investigaciones han evaluado la durabilidad de estos materiales mediante ensayos de ciclos de congelación y descongelación, los cuales evidencian una resistencia variable frente a condiciones extremas. Con base en estos resultados, se puede afirmar que los ecoladrillos con una baja adición de caucho presentan una resistencia y durabilidad adecuadas frente a los ensayos realizados [7,9,11].

D. ANALISIS DE PRECIOS UNITARIOS

El ladrillo ecológico elaborado con polvo de caucho (CP) y una dosificación del 3% cumplió con todos los parámetros exigidos por la normativa. A partir de los resultados obtenidos, se realizó un análisis de costos unitarios, determinando que la materia prima y el caucho CP representan los componentes más relevantes en el costo total, ya que influyen directamente en las características y calidad del producto final. Este costo incluye, además, el precio de adquisición del agua utilizada en el proceso. El análisis de costos de fabricación para la muestra con 3% de caucho reveló que el componente más significativo es el caucho, representando 1.27 soles de un costo total de 1.32 soles por unidad, debido a su precio y cantidad requerida. En comparación, la arcilla y el agua tienen costos considerablemente menores, con 0.05 soles y 0.00317 soles, respectivamente.

Tabla X

Costo de Materiales para Elaboración de Ecoladrillo CP 3%

Material	Unidad	Cantidad Unitaria	P.U.	P.Total PEN
Arcilla	Kg	1.500	0.036	0.05
Agua	Lt	0.634	0.005	0.00317
Caucho Reciclado CP 3%	Kg	2.534	0.500	1.27
Total			S/	1.32

El ladrillo ecológico con un 5% de granulado de caucho reciclado (GCR) cumplió con todos los parámetros establecidos por la normativa correspondiente. A partir de los resultados obtenidos, se calcularon los costos unitarios de los materiales, destacando el caucho GCR como el componente más significativo en el costo total, debido a su impacto en las propiedades y calidad del producto final. Además, este costo incluye el precio del agua utilizada en el proceso de fabricación.

El análisis de costos de fabricación revela que el caucho reciclado representa el componente más relevante, con un costo de 1.20 soles dentro de un costo total de 1.27 soles por unidad, debido a su precio y la cantidad requerida. En comparación, la arcilla y el agua tienen costos considerablemente menores, de 0.07 soles y 0.00299 soles, respectivamente. Esto evidencia que el caucho no solo

desempeña un papel clave en términos económicos, sino que también determina las características del producto, mientras que los demás materiales aportan estabilidad y cohesión a un costo reducido.

En definitiva, el análisis de precios unitarios ha sido abordado en múltiples investigaciones debido a su importancia en la viabilidad de materiales alternativos. La incorporación de caucho reciclado en la fabricación de ladrillos representa una opción económicamente viable para su aplicación práctica. Aunque el costo inicial de producción es relativamente bajo, su sostenible a largo plazo justifica la adopción de esta tecnología. Este estudio confirma que el uso de caucho reciclado no solo genera beneficios ambientales, sino que también contribuye a la sostenibilidad del sector construcción, como lo señalan otros autores [2].

Tabla XI

Costo de Materiales para Elaboración de Ecoladrillo GCR 5%

Material	Unidad	Cantidad Unitaria	P.U.	P.Total PEN
Arcilla	kg	1.900	0.036	0.07
Agua	Lt	0.598	0.005	0.00299
Caucho Reciclado GCR 5%	Kg	2.393	0.500	1.20
Total			S/	1.27

IV. CONCLUSIONES

En conclusión, los ecoladrillos elaborados con caucho en polvo y granulado de caucho reciclado cumplen con los estándares normativos en cuanto a las propiedades físicas de los ecoladrillos elaborados con polvo de caucho en proporciones de 3%, 8% y 13% presentaron variaciones dimensionales de 2.77% en largo, 0.4% en ancho y 0.7% en altura. En el caso del granulado de caucho reciclado (GCR) en proporciones de 5%, 15% y 25%, las variaciones fueron de -0.4% en largo, 1.58% en ancho y 0.4% en altura. Estos resultados cumplen con lo estipulado en la normativa vigente.

En los ensayos de alabeo, los valores registrados para el polvo de caucho fueron de 0.64 mm (3%), 0.58 mm (8%) y 0.36 mm (13%), mientras que para el GCR se obtuvieron 0.28 mm (5%), 0.48 mm (15%) y 0.50 mm (25%). Todos estos valores se encuentran dentro de los límites permitidos por la norma E.070. En cuanto a la absorción de agua, los ecoladrillos con polvo de caucho presentaron valores de 15.99% (3%), 16.17% (8%) y 17.04% (13%), mientras que los ladrillos con GCR alcanzaron 17.59% (5%), 18.93% (15%) y 19.22% (25%). De acuerdo con estos resultados, los ladrillos analizados clasifican como Tipo IV, cumpliendo con los requisitos de la norma E.070 y siendo aptos para su uso como unidades estructurales. Respecto a las propiedades mecánicas, la prueba de resistencia a la compresión arrojó valores promedio de 131.3 kg/cm² (3%), 129.6 kg/cm² (8%) y 128.7 kg/cm² (13%) para los ladrillos con polvo de caucho; y 130.2 kg/cm² (5%), 126.7 kg/cm² (15%) y 127.1 kg/cm² (25%) para los ladrillos con GCR.

Estos valores cumplen con los estándares de la norma E.070, clasificando los ladrillos como Tipo III o IV. Finalmente, se concluye que las proporciones óptimas para equilibrar la reutilización de residuos y la calidad del ecoladrillo son 3% de polvo de caucho con 97% de arcilla y 5% de GCR con 95% de arcilla, destacando que una baja adición de caucho mejora sus propiedades mecánicas y sostenibilidad, lo que los convierte en una opción viable y ecológica para la construcción. Estos resultados subrayan la importancia de integrar materiales reciclados en la industria de la construcción, promoviendo no solo la calidad del producto, sino también un enfoque más sostenible y responsable con el medio ambiente. Además, ofrecen un costo unitario competitivo de S/1.27 por unidad, lo que representa una alternativa viable y beneficiosa para la población de Arequipa y otras regiones.

REFERENCIAS

- [1] U. Nations, “El Acuerdo de París | Naciones Unidas”, Accedido: 18 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.un.org/es/climatechange/paris-agreement>
- [2] F. M. Campoverde Bustos, X. Nieto Cárdenas, and C. P. Takeuchi, “Análisis de ladrillos ecológicos fabricados con suelo limo-arenoso, cemento, viruta y papel, en base a resistencia, costo y deformación,” *Project Design and Management*, 2023, doi: 10.35992/pdm.mo2023.1842.
- [3] M. F. Hernández-Zamora, S. Jiménez-Martínez, J. I. Sánchez-Monge, M. F. Hernández-Zamora, S. Jiménez-Martínez, and J. I. Sánchez-Monge, “Materiales alternativos como oportunidad de reducción de impactos ambientales en el sector construcción,” *Revista Tecnología en Marcha*, vol. 34, no. 2, pp. 3–10, Mar. 2021, doi: 10.18845/TM.V34I2.4831.
- [4] E. J. L. Guerrero, D. P. G. Cuasapaz, and B. I. A. Leon, “Influencia de las partículas de caucho en la resistencia a la compresión de bloques de concreto / Influence of rubber particles on the compressive strength of concrete blocks,” *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería. Universidad del Zulia*, vol. 43, no. 3, pp. 134–141, Sep. 2020, doi: 10.22209/RT.V43N3A03.
- [5] E. Ortiz-Castellanos, D. Cristancho-Fernández, and B. Avellaneda, “Análisis comparativo del desempeño de los ladrillos tradicionales frente a ladrillos pet,” *Sostenibilidad, Tecnología y Humanismo*, vol. 11, no. 1, pp. 54–64, Jan. 2020, doi: 10.25213/2216-1872.36.
- [6] S. P. Muñoz Pérez, A. Serrato Mío, and B. Burga Delgado, “Revisión de las propiedades mecánicas del concreto adicionando residuos de ladrillo de arcilla como sustituto parcial de la arena gruesa,” *Revista Ingeniería de Construcción*, vol. 38, no. 1, 2023, doi: 10.7764/ric.00050.21.
- [7] D. Lizarzaburu-Aguinaga, J. D. F. Gomez, E. Benittes-Alfaro, E. A. Suasnabar, M. G. L. Aguinaga, and R. O. Cumpa, “Recycling of Rubber and Polyethylene Terephthalate (PET) to Produce Ecological Bricks in Peru,” *Chem Eng Trans*, vol. 101, 2023, doi: 10.3303/CET23101034.
- [8] S. M. Al-Tarbi, O. S. Baghabra Al-Amoudi, M. A. Al-Osta, W. A. Al-Awsh, M. R. Ali, and M. Maslehuddin, “Development of eco-friendly hollow concrete blocks in the field using wasted high-density polyethylene, low-density polyethylene, and crumb tire rubber,” *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 21, 2022, doi: 10.1016/j.jmrt.2022.10.027.
- [9] J. S. . Gambin-Martínez, T. I. . Bautista-Zapata, L. M. Torrado-Gómez, M. F. . Serrano Guzmán, y D. D. . Pérez Ruiz, «Ecoladrillos: alternativa para aprovechamiento de arcilla y grano de caucho reciclado», *RIEM*, vol. 23, n.º 1, pp. 1–17, jun. 2023, doi:10.19053/01211048.15699
- [10] P. L. Aziz and M. R. Abdulkadir, “Mechanical Properties and Flexural Strength of Reinforced Concrete Beams Containing Waste Material as Partial Replacement for Coarse Aggregates,” *Int J Concr Struct Mater*, vol. 16, no. 1, 2022, doi: 10.1186/s40069-022-00550-8.
- [11] S. Salehi, M. Arashpour, J. Kodikara, and R. Guppy, “Sustainable pavement construction: A systematic literature review of environmental and economic analysis of recycled materials,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 313, 2021. doi: 10.1016/j.jclepro.2021.127936.
- [12] M. Sambucci y M. Valente, “Caucho de neumaticos de desecho molido como reemplazo total de agregados naturales en mezcla de concreto.”
- [13] MN Oliveira, DF Carvalho, RC Vivas, AKG de Alencar y FA da S. Fernandes, “Producción de ladrillos ecologicos en el Perú”, *Revista Internacional de Investigación y Ciencia de Ingeniería Avanzada*, vol. 8, núm. 5, págs. 113-116, 2021, doi: 10.22161/IJAERS.85.11.
- [14] C. Damiani Lazo, “Ladrillos de concreto con fibras de caucho reciclado”, *Ingeniería Solidaria*, vol. 17, núm. 3, págs. 1-20, septiembre de 2021, doi: 10.16925/2357-6014.2021.03.01.