



Ladrillos hechos de plástico reciclado para mejorar la infraestructura de viviendas rurales en Cusco, Perú

Bricks made from recycled plastic to improve rural housing infrastructure in Cusco, Peru

Carlos Guillermo Vargas Febres¹ * , Yordan Meza del Castillo¹

RESUMEN

La fragilidad estructural, térmica y constructiva de las viviendas rurales en Cusco constituye una problemática muy severa, y se intensifica con las temperaturas estacionales, la escasez de materiales apropiados y la escasa disponibilidad de tecnologías sostenibles. Por ello, el objetivo de la presente investigación fue la fabricación de ladrillos por extrusión, a 280 °C, de tereftalato de polietileno (PET) reciclado, triturado, sin aditivos ni minerales, para rehabilitación de viviendas rurales en Cusco, Perú. La metodología fue experimental y cuantitativa. El ciclo de producción incluyó: recolección, limpieza, secado (a 60°C durante 4 h), trituración mecánica, alimentación a extrusora, extrusión continua, corte mecánico y curado térmico a 120°C durante 6 horas. Los ladrillos fabricados fueron evaluados en laboratorio con ensayos normalizados, obteniendo una resistencia a la compresión promedio de 213,5 kgf/cm², densidad de 0,64 g/cm³ y una absorción hídrica de 0,29%; lo que demuestra muy buena impermeabilidad. En el ensayo térmico, el tiempo de ignición fue de 180,8 s; morfológicamente, los ladrillos poseen estabilidad dimensional (variación <1%) con una masa promedio de 1 080 g, lo que reducirá significativamente la carga muerta en construcciones de baja tecnología. En conclusión, se puede considerar que los ladrillos de PET reciclado extruido, se perfilan como una solución válida y replicable bajo criterios de economía circular y eficiencia térmica, con aplicación directa en la autoconstrucción rural en las regiones altoandinas.

Palabras clave: PET reciclado, ladrillo extruido, vivienda rural, economía circular, sostenibilidad constructiva.

ABSTRACT

The structural, thermal, and construction fragility of rural housing in Cusco presents a very severe problem, which is exacerbated by seasonal temperatures, the scarcity of appropriate materials, and the limited availability of sustainable technologies. Therefore, the objective of this research was the production of extruded bricks at 280 °C from recycled, crushed polyethylene terephthalate (PET), without additives or minerals, for the rehabilitation of rural housing in Cusco, Peru. The methodology was experimental and quantitative. The production cycle included: collection, cleaning, drying (at 60 °C for 4 hours), mechanical crushing, feeding to the extruder, continuous extrusion, mechanical cutting, and thermal curing at 120 °C for 6 hours. The manufactured bricks were evaluated in the laboratory with standardized tests, obtaining an average compressive strength of 213.5 kgf/cm², a density of 0.64 g/cm³, and a water absorption of 0.29%, demonstrating very good impermeability. In the thermal test, the ignition time was 180.8 seconds; morphologically, the bricks exhibit dimensional stability (variation <1%) with an average mass of 1080 g, which will significantly reduce the dead load in low-tech constructions. In conclusion, it can be considered that extruded recycled PET bricks are emerging as a valid and replicable solution under criteria of circular economy and thermal efficiency, with direct application in rural self-construction in the high Andean regions.

Keywords: Recycled PET, extruded brick, rural housing, circular economy, sustainable construction.

¹Universidad Andina del Cusco, Cusco - Perú.

*Autor de correspondencia. E-mail: cvargasfebres@hotmail.com

I. INTRODUCCIÓN

La actividad constructiva de viviendas en las diferentes comunidades rurales del Cusco presenta un importante reto por limitaciones de escasez de materiales, problemas de índole económico y el deterioro de la infraestructura existente (Vargas, 2019); en ese sentido, la innovación en los materiales de construcción sostenibles resulta una necesidad urgente (Firoozi et al., 2025), la propuesta constructiva de la que se está realizando ladrillos a partir de plástico reciclado no solamente buscará contribuir a abordar el problema de escasez en los materiales, sino que también buscará coadyuvar a la finalización o apaciguamiento de la gestión de los residuos plásticos (Firoozi et al., 2024; Jayaweera et al., 2025), que es un reto global que les corresponderá gestionar a las comunidades de muchos lugares del planeta; con esta alternativa constructiva no sólo se reduce la dependencia de los materiales tradicionales y autóctonos como barro y piedra, los cuales muchas veces son escasos o insuficientes para cubrir las necesidades de vivienda, además esta alternativa constructiva será sostenible para el desarrollo rural (Dong et al., 2025; Stenbacka y Cassel, 2024).

Asimismo, el uso de plástico reciclado puede presentar propiedades importantes de resistencia, impermeabilización y eficiencia térmica, características de relevancia en un entorno rural expuesto a diversas condiciones climáticas. Actualmente se destaca que el desarrollo sostenible representa una necesidad ambiental y social, por lo que la adopción de nuevas tecnologías como los ladrillos elaborados a partir de plástico reciclado, pueden mejorar la calidad de vida de las poblaciones rurales, aportando no solo viviendas seguras y económicas sino también promoviendo la importancia del reciclaje y de la reducción de residuos (Chauhan et al., 2021; Kulkarni et al., 2022); este enfoque no solo atenderá de manera directa la infraestructura habitacional, sino que fomentará la cultura de la construcción en la región Cusco, convirtiéndolo en un modelo para exponer la importancia de la sostenibilidad en la vivienda.

La región Cusco representa para el Perú, un importante

centro histórico cultural que atrae cada año a millones de turistas a nivel mundial. sin embargo, y a pesar de la importancia económica y cultural que tiene esta región para el país, en la actualidad son varias las comunidades que se consideran rurales y padecen de vulnerabilidad estructural, situación condicionada por múltiples factores como las olas migratorias de personas que por su calidad de vida podrían considerarse como pobres, una inadecuada atención por parte del estado y en gran medida por la geografía montañosa de la zona que impide la adecuación de los materiales de construcción (Pinedo, 2018). El 80 % de las viviendas registradas están construidas con métodos tradicionales accesibles como el adobe y la piedra que presentan limitaciones en términos de durabilidad y resistencia a los desastres naturales, como terremotos o deslizamientos de tierras; los materiales también presentan carencias en la eficiencia térmica, y debido a las variaciones climáticas de la zona, las viviendas construidas con procedimientos tradicionales tienden a ofrecer un ambiente interior inadecuado (Zamzami et al., 2024).

El escaso acceso a los servicios básicos como agua para uso humano, saneamiento o energía, empeorarían aún más las condiciones de las comunidades y aumentan la exposición de las poblaciones rurales a los riesgos ambientales y merma su calidad de vida (Chui Betancur et al., 2022; Linares y Cuéllar 2023). En este contexto, es necesario proponer alternativas para resolver la problemática expuesta, mediante la integración de tecnología y sostenibilidad, como el uso de ladrillos elaborados a partir de plástico reciclado, que podrían mejorar la calidad de la construcción y contribuir a la gestión de residuos plásticos generados en la región, acorde a las demandas socioeconómicas y ambientales que actualmente imperan en Cusco; la implementación de tecnologías para la construcción sostenible permitirán optimizar los recursos disponibles en la región e involucrar a las comunidades en procesos de capacitación, reforzando la autonomía y la resiliencia frente a desafíos futuros (Romero, 2022).

El crecimiento sostenido del consumo de productos envasados en plástico tereftalato de polietileno (PET),

ha llevado al acopio de ingentes cantidades de residuos no biodegradables en el corto ni en el medio plazo; del mismo modo, en el Perú, se estima que la cantidad de residuos plásticos generados mensualmente excede las 20 mil toneladas, de las cuales únicamente el 2% es correctamente valorizado por el reciclaje mecánico o energético, dicha circunstancia ha propiciado el desarrollo de propuestas tecnológicas con enfoque hacia la reutilización del PET como insumo para la producción de elementos de construcción, teniendo en consideración las propiedades físico-mecánicas de dicho material en cuanto a resistencia a la compresión, baja absorción hídrica y buena estabilidad térmica, (Ministerio del Ambiente. 2018; González y Martínez 2020).

Se han realizado investigaciones para evaluar la viabilidad de bloques/ladrillos que incorporan mezclas de PET reciclado, en combinación con minerales de agregados o con otros polímeros, mediante técnicas como el moldeo por inyección o el prensado en frío. Hay escasas investigaciones sobre el uso de la extrusión térmica directa del PET triturado sin aditivos, como técnica de producción de ladrillos para ser aplicados en el mejoramiento de la infraestructura rural, lo que justifica investigaciones en la caracterización de la estructura y las propiedades térmicas de los mismos, bajo parámetros de producción reproducibles en un entorno de baja tecnología. La relevancia de esta investigación se fundamenta en la necesidad de dar lugar a la generación de soluciones constructivas sostenibles que incorporen los fundamentos de la economía circular y de la gestión ambiental, a partir de los residuos plásticos y su incorporación en tecnologías constructivas de bajo impacto para la vivienda rural; la transferencia de esta tecnología se podría producir a partir de sistemas de producción descentralizada en comunidad, promoviendo el empleo local, la autoconstrucción segura y la disminución de la huella ecológica del sector construcción en la vivienda rural andina.

Sharma y Sharma (2017), se centran en el reciclaje de desechos de plásticos para la elaboración de ladrillos; clasificaron botellas plásticas de PET usadas, y

las convirtieron en partículas finas que se podían compactar, mezclándolas con cemento y arena para obtener unidades de albañilería que se sometieron a distintas pruebas de resistencia y durabilidad, los ladrillos con plásticos tenían adecuada resistencia a la compresión y durabilidad en comparación con los ladrillos de arcilla, el uso de residuos de plásticos como materia prima podría permitir reducir los costos de producción y sería una alternativa para el problema de la acumulación de residuos plásticos.

Naghizadeh et al. (2016), investigaron la influencia de escamas de PET en las propiedades de los ladrillos; para ello prepararon diversas mezclas de arcilla con diferente contenido de escamas de PET y posteriormente, fabricaron ladrillos haciendo uso de una prensa hidráulica llevando a cabo pruebas de resistencia a la compresión, absorción de agua y estabilidad dimensional de los ladrillos. Los resultados demostraron que la inclusión de escamas de PET mejoraba la resistencia a la compresión de los ladrillos, a la par un aumento en la absorción de agua y expansión térmica en los ladrillos en los que el contenido de PET era mayor.

En la misma línea, Reddy y Gupta (2006) investigaron la mampostería de ladrillo modificada por polímeros para verificar su comportamiento bajo esfuerzo de compresión axial; elaboraron ladrillos de arcilla con la incorporación de un polímero acrílico junto al agua de mezcla; se construyeron paredes de mampostería con los ladrillos modificados y se realizó la evaluación de compresión axial; comprobaron que la incorporación del polímero acrílico mejora de forma notable la resistencia y la rigidez del sistema de mampostería de ladrillo; encontraron que la carga se distribuía de forma más uniforme entre los ladrillos disminuyendo así la concentración de esfuerzos en los puntos más críticos de los sistemas de mampostería.

En opinión de Ezejiofor et al. (2019), la incorporación de residuos de PET influye en la resistencia a la compresión y en la absorción de agua de los ladrillos de arcilla; para probar esto elaboraron una mezcla de arcilla con diferentes proporciones de residuos de PET y fabricaron ladrillos por extrusión; los que se sometieron a pruebas de compresión y de absorción

de agua; en los resultados obtenidos se muestra que la incorporación de residuos de PET aumenta la resistencia a la compresión de los ladrillos de arcilla mejorados, y a su vez, el incremento en la absorción de agua sin alcanzar niveles críticos; la resistencia a la compresión incrementada puede ser positiva para aplicaciones constructivas.

Prasad et al. (2018), produjeron ladrillos ecológicos mediante el uso de residuos de PET, siendo este relevante en la generación de ladrillos mediante el uso de la arcilla, preparándose mezclas de arcilla con diferentes proporciones de residuos de PET que se usaron para fabricar ladrillos por extrusión, siendo éstos evaluados mediante pruebas de resistencia a la compresión, de absorción de agua y resistencia al impacto, encontrando que los ladrillos fabricados con residuos de PET poseen resistencia a la compresión y al impacto, mucho mayores que aquellos realizados con arcilla convencional; además, la absorción de agua es menor a mayores proporciones de residuos de PET.

Ccoscco y De La Cruz (2020) analizaron la influencia del PET reciclado sobre las propiedades de los ladrillos de arcilla cocida; prepararon mezclas con arcilla y diferentes porcentajes de PET reciclado y fabricaron ladrillos por extrusión, a los que realizaron ensayos de absorción de agua, resistencia a la compresión y resistencia al impacto; las pruebas mostraron que la adición de PET reciclado reduce la absorción de agua y mejora la resistencia al impacto de los ladrillos; sin embargo, la resistencia a la compresión decreció.

Cardona et al. (2020), realizaron mezclas de arcilla con diferentes porcentajes de PET reciclado y fabricaron ladrillos por extrusión, los que fueron sometidos a pruebas de resistencia a la compresión, absorción de agua y resistencia al impacto; los resultados muestran que el PET reciclado hace que la resistencia a la compresión disminuya, la absorción de agua aumente y la resistencia al impacto mejore considerablemente. Por último, Cabo (2011), preparó mezclas de arcilla con diferentes porcentajes de PET reciclado para producir ladrillos por extrusión, que fueron sometidos a pruebas para evaluar su resistencia a la compresión, su absorción de agua y su densidad aparente; los

resultados muestran que el PET reciclado permitió reducir la densidad aparente y la absorción de agua de dichos ladrillos, sin embargo, su resistencia a la compresión no se vio significativamente alterada.

II. MATERIAL Y MÉTODOS

Se aplicó un diseño de investigación experimental cuantitativo para determinar las características físico mecánicas de los ladrillos de PET extruido y compararlas con las del grupo control que fueron ladrillos de arcilla cocida. La producción de ladrillos con plástico reciclado tiene varias etapas, se inicia con la recolección y clasificación del plástico usado útiles para la fabricación de ladrillos, como el PET que fueron sometidos a limpieza para eliminar las impurezas. Luego, el triturado es fundamental ya que el tamaño del material rige las propiedades finales del ladrillo, empleando un tamiz de $\frac{1}{2}$ " se realizaron tres repeticiones del triturado para obtener la mayor cantidad de plástico, que fue llevado a nuevo proceso de limpieza para eliminar materia orgánica presente o algún contaminante que interfiera con el proceso de extrusión. La extrusora fue pre calentada a temperaturas de inicio (calentar), intermedio (diluir) y final (extruir); en esta etapa es muy importante controlar las temperaturas y los tiempos de extrusión para no degradar el plástico o que pueda ocurrir su cristalización.

Una vez que el PET derretido fluye por la boquilla de la extrusora, se descarta lo que sale en los 3 primeros segundos, cortando el hilo de chorro y colocando la boquilla del molde directo, con ello se espera entre 7 a 10 minutos para que se llene el molde; enseguida, se procede a desinstalar el molde y dejarlo a temperatura ambiente para que se enfríe. Pasados 30 minutos, se procede a desmoldar el ladrillo y a limpiar el molde para volver a utilizarlo; el ladrillo es revisado para que sus características finales cumplan con el prototipo diseñado, luego es enfriado en un contenedor con agua a temperatura ambiente. Finalmente, los ladrillos fueron llevados al laboratorio de mecánica de materiales donde se realizaron ensayos de resistencia a la compresión axial, ensayo de absorción de agua en donde todos los ladrillos fueron pesados en seco, luego se sumergieron en agua durante 24 horas y finalmente,

se pesaron; ensayos de variación dimensional para evaluar alteraciones o deformaciones en los ladrillos; y el ensayo de ignición o prueba de fuego en la que se aplicó fuego directo, con un soplete a gas, y se midió el tiempo en que el material manifiesta patología o falla en su capacidad como unidad de albañilería (Solórzano, 2024).

En una primera etapa, se llevó a cabo la recolección y clasificación de botellas de tereftalato de polietileno (PET) las cuales fueron seleccionadas según su color con el fin de garantizar uniformidad cromática y compositiva en el producto final; posteriormente las botellas fueron sometidas a un proceso de lavado técnico para la remoción de impurezas orgánicas e inorgánicas seguido de un secado natural que permitió evitar interferencias por humedad durante las fases térmicas del proceso, una vez secas, las botellas se trituraron mediante una trituradora de cuchillas hasta obtener fragmentos con granulometría inferior a $\frac{1}{2}$ " los cuales son aptos para su procesamiento en equipos de extrusión; el PET triturado se introdujo de forma dosificada en la tolva de alimentación de la extrusora, donde fue sometido a un incremento progresivo de temperatura hasta alcanzar su punto de fusión, momento en el cual adquirió un estado viscoelástico; la extrusión generó una tira lineal continua con la forma del molde diseñado.

Posteriormente los bloques recién extruidos fueron trasladados a un sistema de enfriamiento controlado, mediante inmersión en una tina de agua a temperatura ambiente con el objetivo de estabilizar su forma y evitar deformaciones estructurales asociadas a gradientes térmicos; finalmente, los ladrillos fueron sometidos a un proceso de curado térmico en horno industrial, a temperaturas previamente determinadas según la formulación del material, con el propósito de mejorar sus propiedades físico mecánicas, en especial su resistencia a la compresión, durabilidad frente a agentes ambientales y estabilidad dimensional.

Es importante tener en cuenta que la metodología puede variar según los recursos y equipos disponibles. Además, se tomarán medidas de seguridad durante todo el proceso, especialmente durante el manejo y triturado de las botellas PET, en la **Figura 1** se

muestran los quipos y de producción de ladrillos.

III. RESULTADOS

Tras la ejecución de los ensayos en laboratorio, se procedió al procesamiento de la información y a la obtención de prototipos de unidades de albañilería (**Figura 2**), representados tridimensionalmente en un diseño compacto. Estas unidades presentan una sección transversal predominantemente rectangular, con paredes perimetrales de espesor constante (1 cm), que delimitan un volumen interno hueco conformado por alveolos. Esta configuración permite reducir el volumen y el peso bruto de la unidad, facilitando, a su vez, la integración de instalaciones hidráulicas y sanitarias a través de los alveolos verticales. Además, se incorporaron elementos simétricos de interconexión longitudinal, que permiten un sistema de ensamblaje tipo machihembrado. Este sistema asegura una adecuada trabazón horizontal, favoreciendo la transmisión de esfuerzos y mejorando la estabilidad estructural y lateral de los muros. Asimismo, la inclusión de pestañas verticales en las caras laterales optimiza la unión mecánica entre las unidades apiladas, incrementando la cohesión del sistema constructivo.

En relación con el insumo principal utilizado en el proceso de fabricación de las unidades de albañilería, se hace referencia a los resultados obtenidos en la **Tabla 1**, donde se comparan el pesaje y el tiempo de triturado de botellas de PET frente al PET ya triturado. Para botellas de 600 ml, se ha registrado una masa inicial promedio de 5,004 kg por muestra, la cual después del tiempo promedio de picado de 23,196 minutos, da una masa promedio de PET picado de 4,36 kg, con una variación de peso negativo promedio de -0,396 kg por muestra, lo que indica pérdidas durante el triturado; el rendimiento específico del triturado, expresado como el promedio del tiempo requerido para triturar 1 kg de PET, es de 4,406 minutos/kg. A diferencia de ello, el procesamiento de botellas de 1500 ml presenta una masa promedio inicial de 3,494 kg por muestra, un tiempo de triturado promedio de 26,8 minutos y una masa promedio de PET triturado de 3,232 kg; la variación de peso negativa promedio fue de -0,262 kg por muestra, ligeramente inferior a la

de las botellas de 600 ml, el rendimiento específico de este tipo de botellas, en cuanto a tiempo de triturado por kilogramo de PET obtenido, fue de un promedio de 8,328 minutos/kg.

La comparación directa de ambos tipos de botellas revela que el tiempo que requiere la obtención de 1 kg de PET triturado es bastante más largo en el caso de las botellas de 1500 ml que en las de 600 ml; la diferencia puede ser atribuida a la geometría y al espesor de las botellas de mayor volumen, lo que puede resultar en una velocidad de procesamiento más lenta del equipo de trituración. El procesamiento de botellas de 600 ml resulta ser más rápido que el de botellas de 1500 ml para obtener PET triturado por cada kilogramo de botellas de PET.

complementariamente, según lo mostrado en la **Tabla 2**, la caracterización granulométrica de las muestras de PET triturado y clasificado con tamiz de 2.5 cm muestra una distribución del tamaño de las partículas de forma diferente dependiendo del origen de las botellas recicladas; para las botellas 600 ml, la masa media inicial de las muestras fue de 4,82 kg y una vez triturado y tamizado se obtuvo 4,636 kg de PET triturado, con una variación de masa negativa promedio de -0,334 kg; la disminución de la masa se debe a los finos generados durante el proceso de trituración que son capaces de atravesar la criba e irse sumando a la masa de los fragmentos inferiores a la dimensión de corte.

Por el contrario, el proceso de botellas de 1500 ml alcanzó los 3,432 kg, tras la trituración y el tamizado, la media de PET fue de 2,912 kg, con una variación de peso negativa media de -0.3 kg. Tal como anteriormente se había comentado, la variación positiva es completamente coherente con la posible acumulación de las partículas finas en la fracción que pasa el tamiz. El tiempo medio de la trituración de este tipo de botellas ronda los 31,084 minutos, lo que equivale a un rendimiento temporal específico de 9,828 minutos para 1 kg de PET triturado inferior a 2.5 cm.

La comparación entre los dos grupos de botellas indica que, si bien la variación de peso después del tamizado es positiva en ambos casos, se obtiene un

rendimiento temporal concreto superior para lograr PET triturado inferior a 2,5 cm para las botellas de 1500 ml en relación con las botellas de 600 ml. Esta diferencia de rendimiento puede estar supeditada a la morfología y la resistencia mecánica propias de las botellas de mayor volumen, la cual puede influir en el proceso de fragmentación y el tiempo para conseguir la granulometría deseada. Esta diferencia estructural se traduce en variaciones no solo en la eficiencia del triturado, sino también en la cantidad de finos generados y el desgaste del equipo.

En este contexto, la **Tabla 3** presenta una comparación entre la masa de ladrillos convencionales de arcilla y los elaborados con PET triturado. Los ladrillos convencionales de arcilla, con una resistencia a la compresión nominal comprendida entre los 2500 y los 3500 kg, y cuya masa media unitaria alcanzó 3,00 kg a partir del análisis de 5 muestras homogéneas; y los prototipos de ladrillo producidos con PET, cuya masa individual promedio fue de 1080,6 kg; esto pone en evidencia una diferencia considerable del peso medio unitario, donde la alta masa de los ladrillos de arcilla con su correspondiente densidad contrasta con la posibilidad que ofrece el PET reciclado de una disminución notoria de la masa en los elementos constructivos, lo que a su vez dota de ventajas en el transporte, la demanda en la capacidad portante de la estructura y la vulnerabilidad sísmica.

En línea con ello, los datos expuestos en la **Tabla 4** evidencian una notable estabilidad dimensional en los ladrillos elaborados mediante extrusión tras ser sometidos a una inmersión de 24 horas, las cinco muestras evaluadas (M-01 a M-05) mantuvieron sus dimensiones prácticamente constantes en longitud, ancho y alto. Los valores promedio de longitud se ubicaron entre 23,03 cm y 23,15 cm, con una desviación máxima de $\pm 0,05$ cm, lo que indica una mínima variación longitudinal. Similar comportamiento se observó en el ancho, con valores consistentes entre 12,00 cm y 12,05 cm, y en el alto, que osciló entre 6,08 cm y 6,13 cm, evidenciando una bajísima propensión al hinchamiento o encogimiento volumétrico.

Estos resultados respaldan la hipótesis de que los

ladrillos de PET reciclado presentan propiedades mecánicas y físicas adecuadas para su uso en construcción, especialmente en contextos donde la estabilidad frente a la humedad es un factor crítico. En comparación con los ladrillos de arcilla cocida evaluados en fases previas del estudio, los prototipos de PET extruido demostraron un comportamiento dimensional igual o superior, consolidando su viabilidad como material alternativo, sostenible y adaptable a diversos contextos constructivos.

Esta solidez estructural se complementa con su densidad aparente, tal como se observa en la **Tabla 5**, donde se reporta una masa promedio de 1081,80 gr. y un volumen medio de 1696,47 cm³ lo que se traduce en una densidad aparente de 0,64 g/cm³ evidenciando una evidente uniformidad dimensional y de masa entre las muestras con coeficientes mínimos de variación que sugieren estabilidad en el proceso de extrusión y corte la baja densidad obtenida confirma el carácter liviano del material lo cual representa una ventaja en términos de transporte manipulación y reducción de cargas estructurales sin comprometer la geometría estándar de los bloques empleados en sistemas constructivos modulares, permitiendo su integración sin necesidad de modificar los métodos tradicionales de ensamblaje.

Por otra parte, el ensayo de resistencia a la compresión, practicado en el laboratorio de materiales de la Universidad Andina del Cusco (**Tabla 6**), mediante la comparación de prototipos se observa que las muestras de ladrillos de PET reciclado tienen una carga promedio (W) de 25889,66 kgf, sobre un área promedio de aplicación de carga (A) de 122,77 cm², da una resistencia a la compresión promedio (C) de 213,546 kgf/cm²; esta resistencia mecánica tiene una capacidad estructural elevada de los ladrillos de PET extruido para soportar fuerzas de compresión. Esta propiedad es clave para su aplicación en estructuras no portantes o de carga limitada, donde se requiere eficiencia estructural sin comprometer la ligereza del material.

Complementariamente, la **Tabla 7** presenta los resultados de resistencia al fuego, en el que se expusieron directamente los ladrillos de PET reciclado

extruido y ladrillos de arcilla cocida, para observar deformaciones o ignición, da un tiempo promedio de resistencia para las muestras de ladrillo de PET de 180,80 s, este ensayo define la capacidad que tiene la unidad de albañilería de resistir la combustión en función de un tiempo determinado expuesto a fuego directo.

IV. DISCUSIÓN

La resistencia a la compresión de los ladrillos de PET reciclado extruido, da un valor medio de 213,5 kgf/cm², avala esta alternativa como una solución alternativa para sistemas de albañilería no portante incluso en muros estructurales de baja carga; comportamiento que se asemeja a los resultados de los trabajos realizados por Sharma y Sharma (2017), que elaboraron ladrillos con mezcla de PET con agregados minerales y obtuvieron un comportamiento satisfactorio en resistencia mecánica. Debiéndose resaltar que en la presente investigación se usó PET reciclado en exclusiva, lo cual determina una innovación importante desde el punto de vista de la economía circular.

Investigaciones como las realizadas por Prasad et al. (2018), también mencionan incrementos en la resistencia a la compresión cuando aumentan en la mezcla la proporción de PET, pero tampoco llegan a los valores reportados en la presente investigación, con lo cual se puede inferir que la extrusión térmica continua del PET sin la utilización de aditivos, es un método más efectivo para incrementar la resistencia mecánica del material.

En lo que respecta a la absorción de agua, se ha demostrado que los ladrillos de PET reciclado extruido son altamente impermeables, con un porcentaje de absorción de agua de solo 0,29%. Este valor representa una clara mejoría con respecto a la de los ladrillos convencionales, y complementan las conclusiones de Ccoscco et al. (2020) y (Chávez y Núñez 2022) que mencionan la baja porosidad y la alta resistencia de los ladrillos recubiertos con PET reciclado. Cabe destacar, en cambio, que los resultados contrastan con los previamente obtenidos en el estudio de Naghizadeh, et al. (2016), donde se pone de manifiesto un incremento de la absorción

de agua al mezclar escamas de PET con arcilla para hacer ladrillos, lo cual se puede explicar en que se utilizó mezclas heterogéneas, así como técnicas de fabricación de prensado que favorecen la generación de vacíos dentro de los mismos.

En lo que respecta a la densidad, los ladrillos de PET tuvieron un promedio de $0,64 \text{ g/cm}^3$, mucho menos que el de los ladrillos de arcilla cocida, la cual típicamente tiene la densidad entre $1,6$ y $1,9 \text{ g/cm}^3$, esta disminución de la densidad sugiere una carga muerta menor sobre las edificaciones pudiendo igualmente dar lugar a características favorables para cargas sísmicas tal como ocurre en la ciudad del Cusco.

La estabilidad dimensional de los ladrillos de PET, debido a que su variación es menor del 1%, le da ventaja en condiciones climáticas adversas; al igual que su baja absorción de agua, para evitar las deformaciones de los bloques producidos en contacto con la humedad, característica importante al momento de diseñar y construir viviendas rurales que pueden ser sometidos a ciclos de congelación y descongelación. Además, el estudio de Ezejiófor et al. (2019), sugiere que un mayor contenido de PET podría inducir a la dilatación del ladrillo, no fue observado en la presente investigación gracias a la homogeneidad ofrecida por la extrusión térmica continua del PET reciclado.

V. CONCLUSIONES

Esta tecnología de fabricación, por extrusión, de ladrillos de PET reciclado es técnicamente sólida y ambientalmente alternativa a los sistemas constructivos convencionales. Los resultados muestran que los ladrillos producidos con esta tecnología presentan un comportamiento físico y mecánico competitivo, haciéndolos materiales adecuados para su uso en la construcción de viviendas rurales en zonas con alta vulnerabilidad estructural y climática.

El valor medio de resistencia a la compresión es de $213,5 \text{ kgf/cm}^2$, que se encuentra dentro del rango aceptable para las unidades de albañilería utilizadas en cerramiento o muros livianos, comprueba una capacidad estructural suficiente para uno o dos niveles de edificaciones en entornos rurales, esta fuerte

característica mecánica se complementa con una baja densidad unitaria ($0,64 \text{ g/cm}^3$), que disminuye el peso sobre la cimentación y mejora el desempeño sísmico de la estructura, particularmente en contextos andinos con frecuente actividad geológica.

Los ladrillos de PET extruido mostraron una absorción de agua muy baja ($0,29\%$), lo que indica una porosidad muy baja y una alta impermeabilidad, cualidades que son deseables en áreas con alta humedad relativa o exposición a fuertes lluvias; además, el tiempo promedio antes del inicio de la combustión fue de $180,8$ segundos, lo que es un valor manejable dentro de un diseño arquitectónico adecuado que tenga en cuenta la protección pasiva contra incendios.

Otro hallazgo destacable es la estabilidad dimensional del material, que muestra una resistencia estructural a la deformación volumétrica provocada por la humedad con una variación inferior al 1%, después de 24 horas de inmersión en agua; por último, el peso unitario promedio de 1080 g por ladrillo y la geometría modular con sistema de machihembrado facilitan la manipulación manual, acortan las jornadas laborales y permiten la construcción de un segundo nivel, suponiendo la adición de aceros de refuerzo vertical en los alveolos de las unidades y complementadas con vaciados de concreto.

VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Cabo Laguna, M. A. (2011). *Viabilidad del uso del PET reciclado como aditivo en la fabricación de ladrillos de arcilla cocida*. [Universidad Nacional de Ingeniería]
- Cardona Howard, F. S., Rengifo Rojas, L. A., Guarín Martínez, J. F., Mazo Castro, D. G., & Arbeláez Pérez, O. F. (2020). Evaluación de las propiedades mecánicas de ladrillos elaborados con residuos de vidrio y plástico. *Lámpsakos*, (24), 60–73. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8047861>
- Ccoscco De La Cruz, N., & De La Cruz Cañavi, L. A. (2020). *Ladrillos ecológicos adicionando plástico PET y evaluación de sus propiedades físico-mecánicas para el diseño de viviendas unifamiliares, Huachipa-2020* [Tesis de licenciatura, Universidad César Vallejo].

- Repositorio Institucional UCV. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/59425>
- Chauhan, S. S., Singh, J. K., Singh, H., Mavi, S., Singh, V., & Khan, M. I. (2021). An overview on recycling plastic wastes in bricks. *Materials Today: Proceedings*, 47, 4067–4073. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2021.05.697>
- Chávez Kevin, P. Á., & Núñez Naranjo, L. P. (2022). Caracterización de bloques con plástico reciclado mediante ensayos de compresión: Characterization of blocks with recycled plastic through compression tests. *Boletín Científico Ideas y Voces*, 2(2). <https://doi.org/10.60100/BCIV>
- Chui Betancur, H. N., Huaquisto Ramos, E., Belizario Quispe, G., Canales Gutiérrez, Á., & Calatayud Mendoza, A. P. (2022). Características de la arquitectura vernácula en zonas altoandinas de Perú. Una contribución al estudio del mundo rural. *Cuadernos de Vivienda y Urbanismo* (15), 1–15. <https://doi.org/10.11144/Javeriana.cvu15.cavz>
- Dong, X., Jiang, G., Xing, Y., Chen, T., & Qu, Y. (2025). Integrating global and local goals: Decoding dynamic evolution and influencing factors of rural settlement sustainable development. *Habitat International*, 162, 103435. <https://doi.org/10.1016/J.HABITATINT.2025.103435>
- Ezejiogor, RA, Nwachukwu, KC, e Ibeh, IC (2019). Evaluación de la resistencia a la compresión y la absorción de agua de ladrillos de arcilla cocida que contienen residuos de PET. *Revista Internacional de Investigación Científica e Ingenieril*, 10 (3), 564–570.
- Firoozi, A. A., Firoozi, A. A., Oyejobi, D. O., Avudaiappan, S., & Flores, E. S. (2024). Emerging trends in sustainable building materials: Technological innovations, enhanced performance, and future directions. *Results in Engineering*, 24, 103521. <https://doi.org/10.1016/J.RINENG.2024.103521>
- Firoozi, A. A., Oyejobi, D. O., & Firoozi, A. A. (2025). Innovations in energy-efficient construction: Pioneering sustainable building practices. *Cleaner Engineering and Technology*, 26, 100957. <https://doi.org/10.1016/J.CLET.2025.100957>
- González, J. L., & Martínez, A. (2020). Evaluación del comportamiento a compresión y propiedades físicas de morteros adicionados con fibras PET recicladas. *Revista Ciencia*, 28(1), 45–58. <https://revistas.utp.edu.co/index.php/revistaciencia/article/view/23771>
- Jayaweera, R., Losacker, S., Song, L. T., & Schwede, D. (2025). Regional preconditions and sustainability transition pathways: Insights from circular, bio-based and resource-efficient building material innovations in Vietnam. *Energy Research & Social Science*, 125, 104133. <https://doi.org/10.1016/J.ERSS.2025.104133>
- Kulkarni, P., Ravekar, V., Rama Rao, P., Waigokar, S., & Hingankar, S. (2022). Recycling of waste HDPE and PP plastic in preparation of plastic brick and its mechanical properties. *Cleaner Materials*, 5, 100113. <https://doi.org/10.1016/J.CLEMA.2022.100113>
- Linares Zaferson, V. E., & Cuéllar Cajahuaringa, N. (2023). Mejoras en el acondicionamiento térmico de viviendas altoandinas en la región Puno. *Anales Científicos*, 83(1), 1–10. <https://doi.org/10.21704/ac.v83i1.1895>
- Ministerio del Ambiente. (2018). En el Perú solo se recicla el 1.9% del total de residuos sólidos reaprovechables. *Notas de Prensa*. <https://www.minam.gob.pe/notas-de-prensa/en-el-peru-solo-se-recicla-el-1-9-del-total-de-residuos-solidos-reaprovechables/>
- Naghizadeh, R., Rashed, GR, y Alizadeh, H. (2016). Efecto del PET residual en las propiedades de los ladrillos de arcilla cocida. *Construcción y Materiales de Construcción*, (127) 828–834.
- Pinedo, J. R. (2018). Desarrollo turístico y pobreza. El caso del Cuzco, Perú. *ROTUR. Revista de Ocio y Turismo*, 12(2), 60–79. <https://doi.org/10.17979/ROTUR.2018.12.2.3458>
- Prasad, KS, Garg, A. y Bhardwaj, R. (2018). Ecoladrillos: Un sustituto sostenible de los ladrillos de arcilla a partir de botellas PET desechadas. *Revista Internacional de Ingeniería*

- Civil y Tecnología* (IJCET), 9 (8), 496–503.
- Reddy, B. V., & Gupta, A. (2006). Strength and Elastic Properties of Stabilized Mud Block Masonry Using Cement-Soil Mortars. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 18(3), 472–476. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2006\)18:3\(472\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2006)18:3(472))
- Romero Mora, L. (2022). *Evaluación de la vivienda con tecnología mejorada del adobe (PRATVIR), en la calidad de vida de los pobladores de las comunidades de Choquepata* [Tesis de pregrado, Universidad Católica de Santa María]. Universidad Católica de Santa María. <https://repositorio.ucsm.edu.pe/items/512b6bf6-004d-48f1-8dc5-ec8f5a93466c>
- Sharma, R. y Sharma, S. (2017). Uso de residuos plásticos en la fabricación de ladrillos. *Revista Internacional de Ingeniería Civil y Tecnología* (IJCET), 8 (5), 290–296.
- Stenbacka, S., & Cassel, S. H. (2024). Planning for socially sustainable rural housing in Sweden. *Journal of Rural Studies*, 110, 103377. <https://doi.org/10.1016/J.JRURSTUD.2024.103377>
- Vargas Febres, C. (2019). La autoconstrucción en la periferia de Cusco. un estudio de enfoque mixto. *AREA*, 25 (2), 1. https://www.area.fadu.uba.ar/wp-content/uploads/AREA2502/2502_vargas-febres.pdf
- Zamzami, H. A., Elanzouli, M., Saidi, J., & Boumeaza, T. (2024). Resilience and Vulnerability: The Haouz Earthquake's Effect on Housing In The Western High Atlas of Morocco. *International Journal for Disaster and Development Interface*, 4(1), 27–51. <https://doi.org/10.53824/IJDDI.V4I1.64>