

Seismic assessment of affordable housing with walls made of PET bottles filled with fine aggregate in rural areas of Peru

Zambrano Paucar, Icei Beck, Bachiller¹; García Zare, Elmis Jonatan, Doctor¹; Rodriguez Paredes, Noelia Patricia, Maestro¹; Mejía Pardo, Patricia Isabel, Maestro¹; Tejada Chavez, Luis Miguel, Maestro¹
¹Universidad César Vallejo, Perú, izambrano@ucvvirtual.edu.pe, ejgarcia@ucv.edu.pe, nrodriguezp@ucv.edu.pe, pamejiap@ucvvirtual.edu.pe, ltejadac@ucv.edu.pe

Abstract— *The main purpose of this study was to evaluate the seismic behavior of a house whose walls are made of PET bottles filled with fine aggregates. An experimental research design was implemented, specifically adopting a quasi-experimental approach. For data collection, technical tests and detailed observation were used as instrumentation methods. The study population and sample included a house categorized as economic and located in a rural area of Peru. In the simulation, a gravelly clayey sand soil type was considered, and the masonry units exhibited an average weight of 1.1844 kg, with a specific gravity of 1.69 g/cm³. The maximum compressive strength of the mortar (f'_c) reached 203.04 kg/cm², while the average load-bearing strength of the masonry prisms (f'_m) was 65.798 kg/cm². Numerical aspects such as maximum interstory distortion were evaluated, registering 0.000009 m in the X-axis and 0.000004 m in the Y-axis. The forces subjected to evaluation in Dynamic Shear were 17.362 tons in X and 16.964 tons in Y. It is crucial to highlight that the house fully complied with the regulatory requirements of the E-030 and E-070 standards, reaffirming its safety in the context of single-family buildings.*

Keywords— *Seismic behavior; affordable housing; PET bottles.*

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LACCEI).
ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).
DO NOT REMOVE

Evaluación sísmica de vivienda económica con muros de botellas PET rellenas de agregado fino en zonas rurales del Perú

Zambrano Paucar, Icei Beck, Bachiller¹; García Zare, Elmis Jonatan, Doctor¹; Rodríguez Paredes, Noelia Patricia, Maestro¹; Mejía Pardo, Patricia Isabel, Maestro¹; Tejada Chavez, Luis Miguel, Maestro¹

¹Universidad César Vallejo, Perú, izambrano@ucvvirtual.edu.pe, ejgarcia@ucv.edu.pe, nrodriguezp@ucv.edu.pe, pamejiap@ucvvirtual.edu.pe, ltejadac@ucv.edu.pe

Resumen. *El propósito fundamental de este estudio fue evaluar el comportamiento sísmico de una vivienda cuyas paredes están conformadas por botellas PET rellenas de áridos finos. Se implementó un diseño de investigación experimental, adoptando específicamente un enfoque cuasiexperimental. Para la recopilación de datos, se emplearon ensayos técnicos y observación detallada como métodos de instrumentación. La población y muestra de estudio incluyeron una vivienda catalogada como económica y ubicada en una zona rural de Perú. En la simulación, se consideró un tipo de suelo de arena arcillosa con grava, y las unidades de albañilería exhibieron un peso promedio de 1.1844 kg, con un peso específico de 1.69 gr/cm³. La resistencia a la compresión máxima del mortero de pega (f'_c) alcanzó los 203,04 kg/cm², mientras que la resistencia de carga promedio de los prismas de albañilería (f'_m) se situó en 65.798 kg/cm². Aspectos numéricos como la distorsión máxima de entrepiso fueron evaluados, registrando 0.000009 m en el eje X y 0.000004 m en el eje Y. Las fuerzas sometidas a evaluación en la Cortante Dinámica fueron de 17.362 toneladas en X y 16.964 toneladas en Y. Es crucial destacar que la vivienda cumplió cabalmente con los requisitos normativos de las normativas E-030 y E-070, reafirmando su seguridad en el contexto de las edificaciones unifamiliares.*

Palabras claves—Comportamiento sísmico; vivienda económica; botellas PET.

I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el crecimiento sustancial de la generación de desechos a nivel mundial, derivado de factores como la sobrepoblación, las prácticas humanas contemporáneas y el excesivo consumismo, plantea un desafío significativo [1,2]. La gestión ineficiente de estos residuos no solo conlleva problemas de salud y daño ambiental, sino también desencadena conflictos sociales y políticos [3,4]. La preservación de nuestro entorno y la adopción del reciclaje de materiales en desuso se tornan esenciales para mitigar la degradación ambiental que día a día afecta la calidad de vida tanto de los seres humanos como de otras especies que comparten este planeta [5,6].

En una investigación reciente, Rolad Geyer, un destacado ecologista industrial, junto con su equipo de la Universidad de California en Santa Bárbara, Estados Unidos, llevó a cabo un exhaustivo análisis con el objetivo de determinar el volumen

total de plástico generado a nivel mundial. El estudio, publicado en la prestigiosa revista Science Advances, desveló una cifra impactante: se han producido alrededor de 8.300 millones de toneladas de plástico hasta la fecha. Este dato revelador pone de manifiesto la magnitud del problema global de la contaminación por plásticos. De la asombrosa cantidad total de plástico producido, aproximadamente 6.300 millones de toneladas se han convertido en residuos. Lo más preocupante es que un alarmante 79% de estos desechos plásticos se encuentra actualmente depositado en vertederos o disperso en el entorno natural, generando consecuencias ambientales adversas. Estos resultados subrayan la urgencia de abordar y replantear los sistemas de gestión de residuos, así como la necesidad de adoptar prácticas más sostenibles en la producción y el consumo de plásticos a nivel mundial. La concienciación y la acción colectiva se vuelven imperativas para mitigar el impacto devastador de la contaminación plástica en nuestro planeta. Esta significativa acumulación de desechos tiene sus raíces en el estilo de vida contemporáneo, donde el plástico se utiliza de manera extensiva en la fabricación de numerosos productos de "uso único" o desechables, que van desde envases plásticos para bebidas hasta pañales, utensilios y hisopos de algodón. Cabe destacar que, según el estudio, China lidera la lista de países con una gestión deficiente de los desechos plásticos, aunque Estados Unidos también se encuentra entre los primeros 20 y presenta una de las tasas más altas de desperdicio por persona [7].

En América Latina, particularmente en Chile, se estima un consumo anual de 990.000 toneladas de resinas plásticas, sin embargo, lamentablemente, solo se logra reciclar el 8,5% de este total, aproximadamente 83.679 toneladas. Aunque esta tasa de reciclaje está dentro del rango general en Chile, que oscila entre el 4% y el 10%, según la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE), aún existe una brecha significativa entre el consumo y la capacidad de reciclaje. Se destaca un esfuerzo particular en la recuperación de alrededor de 7.500 toneladas anuales de tereftalato de polietileno (PET), un plástico ampliamente utilizado en la fabricación de botellas de agua y bebidas gaseosas, cuya demanda continúa en aumento. Este enfoque en el reciclaje de

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LACCEI).
ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).
DO NOT REMOVE

PET no solo aborda la gestión responsable de los desechos plásticos, sino que también representa un paso crucial hacia la sostenibilidad y la reducción del impacto ambiental en la región [8].

En el contexto peruano, apenas el 0.3% del total de plástico, en sus diversas categorías, es objeto de reciclaje, siendo esta una cifra reducida considerando las 950 mil toneladas de plástico desechadas anualmente. De manera específica, las botellas plásticas PET alcanzan una producción anual de 3500 millones, y lamentablemente, menos del 50% de ellas son sometidas al proceso de reciclaje [9]. Adicionalmente, las preocupaciones ambientales relacionadas con el uso excesivo de plástico en América Latina se intensifican al considerar la situación en Perú. Según datos proporcionados por el Ministerio del Ambiente, se estima que cada ciudadano peruano utiliza alrededor de 30 kilos de plástico al año, lo que subraya la magnitud del desafío en términos de consumo per cápita. La problemática se agudiza al examinar la alarmante generación de aproximadamente 3 mil millones de bolsas plásticas anuales en el país, equivalente a casi 6 mil bolsas por minuto. Este vertiginoso ritmo de producción contribuye significativamente a la acumulación de desechos plásticos. En particular, en la zona de Lima Metropolitana y el Callao, la realidad es palpable con la generación diaria de 886 toneladas de residuos plásticos, representando el 46% de la cantidad total a nivel nacional. Estos datos destacan la necesidad urgente de abordar no solo el consumo individual de plástico, sino también implementar estrategias efectivas para gestionar y reducir la producción masiva de envases plásticos, enfocándose en soluciones sostenibles que mitiguen los impactos medioambientales [10]. En el contexto de plásticos biodegradables en Perú, se describe como aquellos que experimentan descomposición hasta convertirse en CO₂, CH₄, agua y biomasa debido a la actividad de microorganismos. Estos plásticos biodegradables deben contener al menos un 50% de sólidos volátiles y concentraciones restringidas de sustancias químicas peligrosas. Además, se espera que logren una degradación del 90% en un lapso de 6 meses en presencia de oxígeno (O₂) y en 2 meses en ausencia de oxígeno [11].

La iniciativa de construir viviendas mediante el uso de botellas se plantea con un propósito central: mejorar sustancialmente la calidad de vida de la población local al fomentar un uso consciente, responsable y sostenible de los recursos disponibles en su entorno [12]. Más allá de los beneficios inherentes a esta construcción ecológica fundamentada en el reciclaje de botellas de PET, la meta es generar una conciencia arraigada en la población, las familias y las comunidades favorecidas, destacando la trascendencia del cuidado ambiental. En consecuencia, aparte de la mejora tangible en las condiciones de vida de los residentes en estas innovadoras viviendas, la iniciativa se propone implementar un plan integral que, desde una perspectiva de trabajo social, estimule un desarrollo productivo y autónomo entre los habitantes de estas casas. Esto implica no solo la construcción de viviendas sostenibles, sino también el establecimiento de

programas educativos y comunitarios que fortalezcan la conexión entre las personas y su entorno, promoviendo prácticas responsables y contribuyendo al bienestar colectivo. En este contexto, la construcción de viviendas con botellas no solo se erige como una solución innovadora y ecológica, sino como un catalizador para el cambio positivo en la comunidad, forjando un camino hacia la sostenibilidad y la conciencia ambiental [13,14].

ECO-TEC Soluciones Ambientales emerge como un referente destacado, proporcionando asesorías ambientales especializadas en la gestión y aprovechamiento de residuos sólidos. Iniciada en 2001 en Honduras y con presencia en Centroamérica, Colombia y Bolivia, la empresa se dedica a ofrecer soluciones dinámicas e innovadoras para abordar la problemática de los desechos. Enfocándose en una visión integral que atiende simultáneamente las cuestiones ambientales y el desarrollo social, ECO-TEC ha llevado a cabo proyectos diversos. Entre ellos, destaca la implementación de un sistema de autoconstrucción que emplea botellas PET no retornables para reemplazar el ladrillo convencional, creando así "ecoladrillos" rellenos de tierra o escombros que se unen para formar estructuras sólidas, demostrando su compromiso con la innovación y la sostenibilidad en las prácticas constructivas [15].

La omisión de la construcción de viviendas ecológicas utilizando botellas PET conlleva diversas causas y consecuencias. En primer lugar, la falta de adopción de prácticas constructivas sostenibles contribuye al incremento de residuos plásticos, agravando la crisis ambiental y afectando los ecosistemas locales. Además, la no utilización de este enfoque ecológico implica una oportunidad perdida para mitigar el impacto ambiental asociado con la construcción, dado que las botellas PET rellenas de arena ofrecen una alternativa más eficiente y respetuosa con el medio ambiente [16]. Por otro lado, las consecuencias económicas se hacen evidentes, ya que la construcción tradicional conlleva costos significativamente más altos en comparación con la opción sostenible. Asimismo, se perpetúa la dependencia de materiales no renovables, generando un ciclo insostenible que afecta tanto al medio ambiente como a las comunidades que podrían beneficiarse de soluciones más respetuosas con el entorno. En última instancia, la no adopción de la construcción ecológica con botellas PET representa un desafío para el desarrollo sostenible, comprometiendo tanto el bienestar del medio ambiente como el económico de las comunidades implicadas [17,18].

Ante el crecimiento poblacional evidente, muchas nuevas familias en el Perú se ven obligadas a construir sus viviendas en áreas rurales, donde frecuentemente lo hacen sin tomar en cuenta criterios de resistencia ante eventos sísmicos. En este contexto, surge como parte de un estudio la pregunta sobre si una vivienda económica, diseñada con muros hechos de botellas PET rellenas de agregado fino y ubicada en una zona rural del Perú, cumple con los estándares establecidos en la Norma E-030 del Reglamento Nacional de Edificaciones (RNE) en términos de comportamiento sísmico. Esta

interrogante representa un desafío significativo y relevante: ¿El comportamiento sísmico de una vivienda económica con muros compuestos de botellas PET rellenas de agregado fino en una zona rural del Perú, se ajusta a los parámetros establecidos en la Norma E-030 del RNE?

La realización de esta investigación se justifica por la necesidad de abordar la fragilidad sísmica a la que están expuestas nuestras zonas rurales del Perú, donde las viviendas a menudo carecen de la infraestructura adecuada para resistir eventos sísmicos. La elección de utilizar botellas PET rellenas de agregado fino como material constructivo se fundamenta en su potencial sostenible y asequible, lo que podría ofrecer una solución eficaz para comunidades con recursos limitados. La evaluación de la respuesta sísmica de una vivienda económica con este enfoque específico proporcionará información crucial para entender la viabilidad y la eficacia de esta alternativa en la construcción. Al comprender cómo estas estructuras responden a fuerzas sísmicas, se podrán identificar posibles mejoras y ajustes para fortalecer la resistencia de las viviendas en estas áreas propensas a terremotos. En última instancia, este estudio contribuirá al desarrollo de prácticas constructivas más seguras, sostenibles y accesibles, teniendo en cuenta las condiciones específicas de las zonas rurales peruanas.

El propósito principal consistió en evaluar el comportamiento sísmico de una vivienda económica en una región rural del Perú, construida con paredes hechas de botellas PET rellenas de árido fino. El enfoque se centró en comprender cómo esta innovadora construcción se comporta frente a eventos sísmicos, ofreciendo una perspectiva integral sobre la viabilidad y la resistencia de este tipo de edificación en entornos rurales específicos del Perú.

II. MARCO TEÓRICO

A nivel internacional, en Canadá, se fabricó una vivienda de aspecto distintivo con tonalidades de ladrillo, negro y blanco en una zona rural. Esta residencia, compuesta por aproximadamente 612,000 botellas de plástico recicladas, ha sido sometida a un proceso de trituración y fusión para convertirlas en paredes con un grosor de aproximadamente 15 centímetros. Esta iniciativa no solo proporciona una solución innovadora al problema del exceso de residuos contaminantes en Nueva Escocia, que suelen derivarse de la construcción con materiales convencionales, sino que su estructura también encierra beneficios adicionales. Además de reducir la cantidad de botellas plásticas que terminan en vertederos o contaminan cuerpos de agua al ser dirigidas hacia plantas de reciclaje, esta construcción presenta una ventaja ambiental adicional. La vivienda ofrece un refugio en áreas propensas a eventos meteorológicos extremos, como vientos huracanados, contribuyendo así a la seguridad y la resiliencia de las comunidades afectadas por tales condiciones climáticas adversas [19].

En México, ha sido implementado un innovador proyecto de vivienda ecológica, construido mediante el uso de botellas de Polietileno Tereftalato (PET) y vidrio. Esta iniciativa se

presenta como una solución integral destinada a mejorar las condiciones de vida de numerosas familias con recursos limitados, abordando de manera competente la crisis habitacional y ambiental que afecta al país. La concepción de estas viviendas ecológicas surge de un interés genuino y una necesidad imperante de preservar nuestro planeta, focalizándose especialmente en el sector más desfavorecido, con el propósito de reducir los niveles de pobreza y marginación. En la actualidad, el proyecto de construcción de viviendas utilizando botellas ha comenzado a generar resultados positivos, destacando el liderazgo de Tlaxcala a nivel nacional como pionera en la implementación de viviendas ecológicas elaboradas con botellas de PET y vidrio, así como materiales reciclados como madera y lonas utilizadas en campañas políticas anteriores. Estas técnicas se centran en privilegiar la conservación del medio ambiente y, al mismo tiempo, contribuir al mejoramiento sustancial de la calidad de vida de quienes las ocuparán [20].

A nivel nacional, en Chimbote, una universidad privada ha presentado la primera vivienda ecológica construida con botellas plásticas PET, beneficiando a los habitantes de un asentamiento humano local. Para su realización, se utilizaron alrededor de 20 mil botellas plásticas de 600 ml, rellenas de arena en capas debidamente compactadas y selladas, formando ecoladrillos que se emplearon en la construcción de estructuras y muros. Estos fueron asegurados con cemento para proporcionar mayor estabilidad y durabilidad. La vivienda cuenta con instalaciones sanitarias, sistemas eléctricos, acabados, sala de espera, salón para reuniones y servicios higiénicos, destinándose a ser utilizada como una posta médica para la comunidad local. Desde una perspectiva técnica, la obra cumple con normas antisísmicas, soportando sismos de hasta 8 grados, y ofrece un mejor aislamiento acústico, además de ser mucho más duradera. En términos económicos, el costo de esta vivienda es apenas un 50% de lo que implicaría construir una casa con materiales y técnicas tradicionales [21].

Además, en una investigación para determinar las características de los elementos PET para su implementación como unidades constructivas en muros de carga, se llegó a la conclusión de que una manera efectiva de reducir la contaminación asociada a las botellas PET y mitigar su dominante presencia en depósitos de desechos es atribuirles un valor significativo como material útil en distintos sectores de la industria. Este enfoque, a largo plazo, podría resultar en avances significativos a favor de la ecología [22]. En otro estudio, se elaboró elementos de albañilería empleando plásticos reciclados, utilizándolos en paredes que no soportarían ninguna carga. En esta investigación la población eran ladrillos con parámetros de 20x10x6cm a las que se le adicionaron PET al 10%, 25%, 40%, 55%, 65% y 70% reemplazando parte de los áridos finos y el elemento muestral consideró 3 probetas de cada dosificación. Sintetizando que, el polietileno tereftalato (PET) presenta la ventaja de no generar emisiones nocivas, tanto en la fabricación de hormigón como en diversos entornos residenciales. Este estudio sobre la creación de un componente

de construcción a partir de plástico se considera una alternativa sostenible para la producción de recursos en la construcción, evitando la contaminación y reduciendo al mínimo la generación de residuos. [23].

De igual manera, al adentrarnos en un análisis más detallado sobre el aporte de las unidades de albañilería elaboradas a partir de ladrillos PET en la construcción de viviendas sostenibles destinadas a la expansión del Distrito de Nuevo Chimbote, se ha llegado a la conclusión de que estas estructuras cumplen de manera integral con los estándares y requisitos establecidos por la normativa actual en el país para la industria de la construcción. Este hallazgo subraya la capacidad y eficacia de las construcciones basadas en ladrillos PET para no solo cumplir con las normativas existentes, sino también para contribuir de manera significativa al desarrollo de prácticas constructivas más amigables con el medio ambiente en la región mencionada. Es relevante destacar que, durante las pruebas de resistencia sísmica, se logró una excelente concordancia, demostrando la capacidad de las viviendas para resistir los efectos de los eventos sísmicos, lo cual es crucial en zonas propensas a tales fenómenos. Además, los resultados de la prueba de resistencia a la compresión en prismas fabricados con PET exhibieron una resistencia promedio de 42 kg/cm², reforzando la robustez estructural de esta innovadora solución constructiva. Estos hallazgos no solo respaldan la viabilidad técnica de la implementación de ladrillos PET en la construcción de viviendas sostenibles, sino que también subrayan su capacidad para cumplir con los estándares de seguridad y resistencia exigidos por la normativa nacional, consolidando así su posición como una alternativa eficaz y ecoamigable en el ámbito de la construcción [24]. También, al analizar la vulnerabilidad sísmica de las construcciones de albañilería confinada en las zonas rurales del Perú, se evidencia que, dentro de las estructuras erigidas con materiales tradicionales en la región, la mayoría carece de una construcción respaldada por un profesional y no se ajusta adecuadamente a las normas vigentes. Esto conduce a importantes carencias en las estructuras de las viviendas, a pesar de que su construcción podría considerarse aceptable, lo que pondría en riesgo su capacidad para resistir terremotos [25]. Durante la etapa final de la investigación, al analizar la susceptibilidad sísmica de las casas autoconstruidas de albañilería confinada en Recuay, una ciudad en Ancash, se reveló que la mayoría de las viviendas estudiadas fueron levantadas sin cumplir con las regulaciones pertinentes para evaluar su resistencia ante sismos. Sorprendentemente, solo un reducido número de propiedades optaron por incorporar un diseño sismorresistente, a pesar de encontrarse en una zona con una actividad sísmica significativa, como es característica de esta región. Este hallazgo resalta la falta generalizada de conciencia y aplicación de medidas constructivas que puedan mitigar los riesgos sísmicos en una zona propensa a eventos de esta naturaleza. Además, pone de manifiesto la necesidad urgente de promover y aplicar prácticas constructivas más seguras y resistentes a sismos en comunidades vulnerables, no

solo para preservar el patrimonio arquitectónico, sino también para salvaguardar la vida y bienestar de los habitantes en estas áreas sísmicas [26].

A. Botella de plástico PET

El plástico, una sustancia compuesta por diversos porcentajes de petróleo, aire y gas natural, tiene su principal aplicación en la fabricación de envases para líquidos [27]. En particular, las botellas plásticas reciclables se clasifican siguiendo el Código de Identificación Plástico (RIC), que utiliza símbolos y números para su identificación. Este sistema permite distinguir entre plásticos que son aptos para ser reutilizados y aquellos que no lo son. Las botellas plásticas reciclables, diseñadas para ser reutilizadas, suelen presentar en la parte inferior o en la etiqueta un triángulo conformado por tres flechas, acompañado de un número que varía entre 1 y 7 [28]. Este código no solo facilita la identificación, sino que también proporciona información sobre el tipo de plástico utilizado en la fabricación de la botella, permitiendo a los consumidores y a los procesadores de reciclaje tomar decisiones informadas sobre su manejo y reciclaje. Este enfoque en la clasificación y etiquetado contribuye a fomentar prácticas más sostenibles y a mejorar la eficiencia en los procesos de reciclaje, promoviendo así la reducción de residuos y la gestión responsable de los materiales plásticos.

B. Agregado fino

Este componente abarca minerales que tienen la capacidad de atravesar el tamiz número 4, siendo evaluados en términos de su granulometría. La aplicación práctica de este material se ilustra a través de su uso con fines estéticos al finalizar un proyecto, aportando una textura y apariencia visualmente atractivas. Asimismo, se destaca su utilidad en la mejora de la manejabilidad de la mezcla, donde la cantidad de agua y el asentamiento permitido son considerados meticulosamente. Este enfoque integral no solo resalta las propiedades técnicas de los elementos minerales, sino que también subraya su versatilidad en diferentes contextos, desde la estética hasta la funcionalidad práctica en la manipulación de mezclas en diversas aplicaciones constructivas [29].

B. Comportamiento sísmico

La sismología emerge como una disciplina científica especializada en la investigación del fenómeno sísmico, sumergiéndose en la búsqueda de las causas que lo originan y examinando minuciosamente la propagación de la energía liberada, así como sus características inherentes [30]. En el ámbito del comportamiento sísmico, se hace referencia a una amalgama de factores, tanto numéricos como cualitativos, que proporcionan una valiosa información sobre cómo una estructura puede reaccionar o sufrir daños frente a eventos sísmicos [31]. Este enfoque holístico no solo se centra en la comprensión de las fuerzas sísmicas en sí, sino que también busca descifrar la complejidad de las respuestas estructurales ante dichos eventos, contribuyendo así al desarrollo de estrategias efectivas de diseño y construcción que mitiguen los riesgos sísmicos.

D. Vivienda Económica con muros de botellas PET rellenas de agregado fino

La construcción de edificaciones con una superficie que oscila entre 30m² y 50m² se caracteriza por la implementación de paredes compuestas por unidades de polietileno tereftalato, comúnmente conocido como botellas PET. Este innovador enfoque aprovecha la versatilidad de las botellas PET, a las cuales se les agrega material fino para transformarlas en unidades de albañilería sólida y eficiente. Esta técnica se fundamenta en el concepto previamente explorado en el marco teórico, que destaca la capacidad de las botellas PET y el agregado fino para ser utilizados como elementos fundamentales en la construcción de estructuras duraderas y sostenibles. Así, la combinación de estos materiales no solo se alinea con principios eco-amigables, sino que también ofrece una solución práctica y eficaz para la edificación de viviendas con dimensiones moderadas.

III. METODOLOGÍA

Se emprendió una investigación de naturaleza aplicada con un diseño cuasiexperimental, según lo descrito en la literatura especializada [32,33]. La muestra seleccionada para este estudio abarcó el diseño de una vivienda económica ubicada en una zona rural de la región Sierra del Perú. El análisis se llevó a cabo siguiendo los criterios y directrices establecidos en el Reglamento Nacional de Edificaciones (RNE), con un enfoque particular en las secciones E-030, centrada en el Diseño Sismorresistente, y E-070, que aborda la Albañilería. Para realizar el modelado y análisis estructural correspondiente, este desarrollo se integró completamente en un software especializado en ingeniería estructural. La salida generada por el software fue minuciosamente cotejada con los estándares establecidos en el RNE, garantizando así la conformidad con las normativas nacionales de construcción. En relación con las pruebas llevadas a cabo en probetas y prismas de albañilería constituidos por unidades PET (Tereftalato de Polietileno) rellenas de árido que alcanzan un peso promedio de 1.1844 kg y un peso específico de 1.69 gr/cm³, se procedió a la determinación de sus propiedades mecánicas mediante la utilización de equipos de compresión de laboratorio. Este enfoque experimental permitió obtener información detallada sobre la resistencia y el comportamiento estructural de estas unidades innovadoras, contribuyendo significativamente al entendimiento de su viabilidad y eficacia en aplicaciones constructivas reales.

IV. RESULTADOS

TABLA I
CARACTERÍSTICAS DEL SUELO PARA LA SIMULACIÓN DE LA VIVIENDA ECONÓMICA

Clasificación SUCS:	SC
Detalle	Arena con contenido arcilloso y presencia de grava.

Porcentaje de humedad inherente	10.891	
Ángulo de resistencia interior	37.91 grados	0.66162 rad
Fuerza de cohesividad	0.081 kg por cada cm ²	
Capacidad de carga	(K _{p_v}) =	43.0766
	N _c =	30.24
	N _q =	16.7
	N _γ =	13.93
Coefficiente de elasticidad	E _s =	1171 T _n /m ²
Asentamiento admisible	d =	2.501 cm
Capacidad permitida por Asentamiento	q _{adm x asent} =	1.21 kg/cm ² 0.12 pa

TABLA II
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DEL AGREGADO FINO

NORMA NTP 400.012 / ASTM C 136							
Tamiz (N°)	Diam (mm)	Peso			% PASA	Huso NTP 400.0371	
		fi	%	% acum			
4	4.75	129	2.294	2.294	97.706	95	100
8	2.38	414.3	7.368	9.662	90.338	80	100
16	1.19	1418	25.219	34.881	65.119	50	85
30	0.595	2018.9	35.906	70.787	29.213	25	60
50	0.297	838.6	14.914	85.701	14.299	10	30
100	0.148	614.2	10.923	96.625	3.376	2	10
Cazoleta	0	189.8	3.376	100	0.000	-	-
TOTAL	-	5622.8	-	-	-	-	-
Módulo de fineza		3.00					

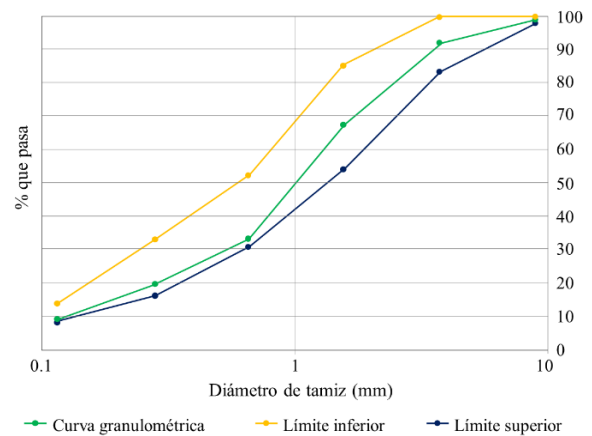


Fig. 1 Curva granulométrica del agregado fino.

TABLA III
CAPACIDAD DE COMPRESIÓN DEL MORTERO EN LOS PRISMAS DE ALBAÑERÍA

Resistencia a la compresión	Especimen				Promedio
	1	2	3	4	
radio (cm)	15.2	15.1	15.1	15	15.1
área (cm ²)	181.459	179.079	179.079	176.715	179.083

altura (cm)	30.5	30.2	30.1	30.2	30.25
peso (Kg)	11778.8	11501.3	11616.7	11709.1	11651.475
Tiempo (días)	7	14	21	28	
Capacidad (Kg)	17320	29170	35540	35880	
Mpa (Kg./cm ²)	95.449	162.889	198.46	203.039	

Cortante basal en (X) y (Y)	Sin Especificación	20.1058 Tn.
-----------------------------	--------------------	-------------

V. DISCUSIÓN

Esta investigación se propuso evaluar el comportamiento sísmico de una vivienda económica en una zona rural del Perú, cuyos muros fueron construidos utilizando elementos PET rellenas de árido fino. La importancia medioambiental de este estudio reside en su enfoque en la sostenibilidad, al utilizar materiales reciclados como las botellas PET, lo que contribuye a la reutilización de recursos y reduce la huella de carbono asociada a la construcción [12,13,14]. Este enfoque no solo busca comprender la resistencia sísmica de la estructura, sino también promover prácticas constructivas más ecológicas [1,2,3].

En la tabla I, se detallan los valores numéricos que reflejan el desempeño sísmico de la edificación expuesto al espectro de diseño establecido por la norma E-0.30 para una zona rural del país. Estos datos incluyen la distorsión máxima en los ejes (x; y) y las fuerzas de cortante dinámica para cada eje de análisis. Esta información concuerda con lo señalado por Ramírez, quien destaca la importancia de tomar precauciones en la planificación de proyectos, especialmente teniendo en consideración que nos encontramos en un país con notable actividad sísmica [26].

Según los datos presentados en la tabla II, las botellas de PET llenas de agregado fino tienen un peso medio de 1.1844 kg y una densidad de 1.69 gr/cm³. Además, se observa un módulo de finura del agregado fino de 3.00. Esto sugiere que estas botellas están siendo utilizadas como recipientes para almacenar agregados finos, mostrando un peso y densidad consistentes con los estándares esperados para este tipo de material, junto con un módulo de finura que indica su granulometría. Estos resultados coinciden con la perspectiva de Angumba, quien destaca la fabricación de elementos de construcción con plástico como una alternativa sostenible para edificar de manera no contaminante y reducir la generación de residuos sólidos [23]. La tabla III se enfoca en la resistencia a la compresión máxima del mortero, se revela una dosificación de 210 kg/cm² y una carga máxima de resistencia de 203.039 kg/cm² a los 28 días. En la tabla IV, que se enfoca en la prueba de prismas de albañilería rellenos con botellas PET, se observa una resistencia máxima de 65.798 kg/cm², la cual es equiparable a la resistencia de un ladrillo de arcilla del tipo King Kong Industrial. Esto indica que los prismas de albañilería fabricados con botellas PET tienen una capacidad de resistencia considerable, similar a la de los ladrillos tradicionales utilizados en aplicaciones industriales. Este hallazgo resalta el potencial de las botellas PET como un material de relleno efectivo en la construcción de unidades de albañilería con propiedades mecánicas satisfactorias.

Estos resultados contrastan con la investigación de Quevedo, que documentó un promedio de resistencia final de 42 kg/cm² en prismas elaborados con botellas PET [24]. Finalmente, la

TABLA IV
ENSAYO POR COMPRESIÓN DE PRISMAS DE ALBAÑERÍA

	Especimen					
	1	2	3	4	5	6
	14 días		21 días		28 días	
H: Altura de Pila	29.51	29.71	29.62	29.71	29.82	30.11
T: Espesor	15.51	15.31	15.52	15.61	15.31	15.32
E: Esbeltez	1.903	1.942	1.921	1.904	1.962	1.991
Área transversal de sección	240.251	234.12	240.31	243.42	231.041	228
Máxima carga soportada	4500	7780	8910	11240	15610	14600
Capacidad de compresión Axial(f'm) kg/cm ²	18.73	33.24	37.09	46.19	67.564	64.03
f'm promedio:	65.798 /cm ²					

TABLA V
ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO SÍSMICO DE LA VIVIENDA
ECONÓMICA

Análisis de albañería	De acuerdo a la Normas: E-030 y E-070	Resultados
Em: Espesor efectivo del muro	$t \geq h/20$, para z3	$t = 0.13$ m
Dm: Densidad de muros	$\frac{\sum L \cdot t}{AP} \geq \frac{Z \cdot U \cdot S \cdot N}{56}$	Ejes X= 0.0838 \geq 0.0084 Y= 0.0901 \geq 0.0084
Ve: Cortante estático	Para: $V_e > V_d$ $V_d = 0.8 V_e$	Ejes X= Y= 20.106
Vd: Cortante dinámico		Ejes X= 17.362 (86%) Y= 16.964 (84%)
Periodos de oscilación	Perfil del suelo (S ₂) $T_p \geq 0.6$	0.015
Desplazamientos máximos en el eje (X) y (Y)	Sin Especificación	0.000031 y 0.000005
Distorsión de entre piso en X y Y	Para Albañilería 0.05m>	0.0000091 y 0.00000041
Centro de masa en (X) y (Y)	Sin Especificación	3.49 m y 3.50 m
Centro de rigidez en (X) y (Y)	Sin Especificación	3.43 m y 3.91 m

tabla V se centra en evaluar la resistencia sísmica de la vivienda mediante el uso de software estructural, los resultados indican que la torsión sísmica cumple con los parámetros establecidos por la norma E-0.30 [25]. Según la definición de Moreno y Bairán, este análisis sísmico cumple con los controles de seguridad exigidos por la normativa actual para una estructura resistente [30]. Estos hallazgos consolidan la evidencia de la viabilidad técnica y la solidez estructural de las unidades de albañilería con botellas PET, respaldando su potencial aplicación en la construcción sostenible.

La presente investigación está sujeta a ciertas limitaciones, entre las que se incluye la compatibilidad del PET con el mortero empleado para la unión de las unidades de albañilería. Dada la necesidad de aditivos para mejorar la adherencia y resistencia de la unión entre las botellas de PET y el mortero, se reconoce la posibilidad de que estos aditivos introduzcan variables adicionales que podrían influir en los resultados finales de la investigación.

En consecuencia, se sugiere la continuidad de estudios a largo plazo, comparativos con otras técnicas constructivas y la difusión de estos resultados a niveles comunitarios, gubernamentales y académicos para fomentar la adopción de prácticas constructivas sostenibles y respetuosas con el medio ambiente. En conclusión, esta investigación ha arrojado luz sobre el comportamiento sísmico de una vivienda económica en una región rural del Perú, construida con muros de albañilería PET rellenas de árido fino [29]. Los resultados obtenidos proporcionan evidencia sólida de la viabilidad estructural de esta innovadora técnica constructiva, destacando la resistencia de la vivienda frente a eventos sísmicos. Además, la utilización de materiales reciclados como las botellas PET contribuye significativamente a la sostenibilidad ambiental, reduciendo la huella de carbono asociada a la construcción [31]. Como recomendaciones, se sugiere la continuación de estudios a largo plazo para evaluar el rendimiento a lo largo del tiempo de estas estructuras en condiciones reales. Además, se podrían realizar análisis comparativos con otras técnicas constructivas convencionales para obtener una visión más completa de las ventajas y desventajas de la construcción con botellas PET. Además, se insta a la difusión de los hallazgos de esta investigación a nivel comunitario, gubernamental y académico, con el objetivo de fomentar la adopción de prácticas constructivas sostenibles en entornos similares. En última instancia, este estudio no solo contribuye al conocimiento técnico y científico en el campo de la ingeniería estructural, sino que también ofrece perspectivas valiosas para abordar desafíos habitacionales y medioambientales en comunidades rurales, promoviendo soluciones innovadoras y sostenibles para mejorar la calidad de vida.

VI. CONCLUSIÓN

Se procedió a establecer las propiedades del sustrato simulado destinado a la construcción de la vivienda, describiéndolo como una combinación de arena con contenido arcilloso y presencia

de grava, incorporando aspectos como el Ángulo de Fricción Interna, Módulo de Elasticidad, Asentamiento Admisible, Capacidad de Carga, Cohesión, Humedad Natural y Capacidad Admisible por Asentamiento. Estos parámetros fueron luego integrados en el software estructural para llevar a cabo un análisis sísmico exhaustivo de la vivienda económica correspondiente. Se realizó una evaluación detallada de las características de los componentes principales de las unidades de albañilería, centrándose en las botellas PET y el material fino utilizado para su relleno. Este análisis comprendió varios aspectos, como el peso medio de las muestras, que se registró en 1.1844 kg, el peso específico de las unidades de albañilería, establecido en 1.69 gr/cm³, y la distribución granular del agregado. Además, se consideró la resistencia máxima a la compresión del mortero (f_c), que es fundamental para la producción de los Prismas de Albañilería, y se fijó en 203,039 kg/cm². Este examen exhaustivo proporciona una comprensión completa de las características y propiedades de los materiales utilizados en la construcción de las unidades de albañilería. Las pruebas de resistencia a la compresión realizadas en los Prismas de Albañilería, que contenían botellas PET rellenas de agregado fino, revelaron una capacidad de carga promedio (f_m) de 65,798 kg/cm². Para determinar la capacidad de resistencia sísmica de la vivienda, se utilizó un software estructural que cumplió con todas las regulaciones establecidas por el Reglamento Nacional de Edificaciones (RNE). Durante este proceso, se definieron y aplicaron cargas de análisis, como el Cortante Dinámico, el Período de Oscilación del Suelo y la Máxima Distorsión del entrepiso. Los resultados obtenidos de estas evaluaciones confirman la solidez estructural y la capacidad de adaptación de la vivienda ante eventos sísmicos. Esta evidencia respalda de manera concluyente la efectividad y sostenibilidad del enfoque constructivo implementado, demostrando su idoneidad para proporcionar seguridad y protección a los ocupantes frente a posibles terremotos.

REFERENCIAS

- [1] JR Jambeck, R. Geyer, C. Wilcox, TR Siegler, M. Perryman, A. Andrady, N. Ramani, KL Law, "Plastic waste inputs from land into the ocean," *Science*, vol. 347, pp. 768-771, 2015.
- [2] M. Eriksen, LCM Lebreton, SA Carson, M. Thiel, CJ Moore, JC Borerro, F. Galgani, PG Ryan, J. Reisser, "Plastic pollution in the world's oceans: more than 5 trillion plastic pieces weighing over 250,000 tons afloat at sea," *PLoS ONE*, vol. 9, e111913, 2014.
- [3] LCM Lebreton, SD Greer, JC Borrero, "Numerical modeling of floating debris in the world's oceans," *Mar. Pollut. Bull.*, vol. 64, pp. 653-661, 2012.
- [4] A.L. Andrady, "Persistence of Plastic Litter in the Oceans," in M. Bergmann, L. Gutow, M. Klages (eds.), "Marine Anthropogenic Litter," Springer, Cham, 2015, pp. 10-3, https://doi.org/10.1007/978-3-319-16510-3_3.
- [5] G. Schernewski, H. Radtke, R. Hauk, C. Baresel, M. Olshammar, S. Oberbeckmann, "Urban Microplastics Emissions: Effectiveness of Retention Measures and Consequences for the Baltic Sea," *Front. Mar. Sci.*, vol. 8, article 594415, 2021, doi: 10.3389/fmars.2021.594415.
- [6] L. Lebreton, J. van der Zwet, JW. Damsteeg, et al., "River plastic emissions to the world's oceans," *Nat. Commun.*, vol. 8, article 15611, 2017, <https://doi.org/10.1038/ncomms15611>.
- [7] A. Marcos, "Unos 8.300 millones de toneladas de plástico circulan por el mundo," Agencia SINC, 2017. [Online]. Disponible en:

- <https://www.agenciasinc.es/Noticias/Unos-8.300-millones-de-toneladas-de-plastico-circulan-por-el-mundo>.
- [8] J. Molina, C. González, "Desafío para la Ley REP: En Chile se recicla el 8% del plástico, y solo un 17% de ello proviene de los hogares," País Circular, 27 de marzo de 2019. [Online]. Disponible en: <https://www.paiscircular.cl/industria/desafio-para-la-leyrep-en-chile-se-recicla- apenas-el-8-del-plastico-y-solo-un-17-proviene-de-loshogares/>
- [9] Tecnología del Plástico, "Procesos de reciclaje de PET para fabricación de botellas," 2023. [Online]. Disponible en: <https://www.plastico.com/es/noticias/reciclaje-de-pet-para-fabricacion-de-botellas>
- [10] Ministerio del Ambiente, "Consumo de bolsas de plástico en el país se redujo en más de mil millones de unidades," 2019. [Online]. Disponible en: <https://www.gob.pe/institucion/minam/noticias/70995-consumo-de-bolsas-de-plastico-en-el-pais-se-redujo-en-mas-de-mil-millones-de-unidades>
- [11] N. Liberato, "Microorganismos eficientes y su efecto en el tratamiento de lixiviados generados en el proceso de compostaje en el centro ecoturístico de protección ambiental 'Santa Cruz' - CEPASC, Concepción, 2019."
- [12] Y.C. Jang, G. Lee, Y. Kwon, J.H. Lim, J.H. Jeong, "Prácticas de reciclaje y gestión de residuos de envases de plástico hacia una economía circular en Corea," Recurso. Conservar. Reciclar., vol. 158, p. 104798, 2020.
- [13] M.Z. Rahman, M. Rahman, T. Mahbub, M. Ashiquzzaman, S. Sagadevan, M.E. Hoque, "Biopolímeros avanzados para aplicaciones de ingeniería de aviación y automóviles," J. Polim. Res., vol. 30, pp. 1–16, 2023. Beniathiar, P.; Kumar, P.; Carpintero, G.; Apoyo, J.; Mishra, DK Reciclaje botella a botella de tereftalato de polietileno (PET) para la industria de bebidas: una revisión. Polímeros 2022 , 14 , 2366.
- [14] P. Beniathiar, P. Kumar, G. Carpintero, J. Apoyo, D.K. Mishra, "Reciclaje botella a botella de tereftalato de polietileno (PET) para la industria de bebidas: una revisión," Polímeros, vol. 14, p. 2366, 2022.
- [15] ECOTEC Soluciones Ambientales, "tupatrocinio.com," [En línea]. Disponible en: <http://www.tupatrocinio.com/patrocinio.cfm/proyecto/00186090092948506568565148494567.html#descripcion>. [Citado el: 19 de agosto de 2015].
- [16] F.F. Wang, H.W. Wu, J.N. Li, J.L. Liu, Q.J. Xu, "Una microfibrilla LH liberada en ríos urbanos desde máscaras faciales durante COVID-19," J. Medio Ambiente. Gestionar., vol. 319, p. 115741, 2022.
- [17] H.P. Wang, X.-H. Huang, J.-N. Chen, M. Dong, Y.-Y. Zhang, L. Qin, "Verter agua caliente a través de bolsas de goteo libera miles de microplásticos en el café," Química de los alimentos, vol. 415, p. 135717, 2023.
- [18] J. Hong, X.H. Huang, Z.K. Wang, X.Z. Luo, S.Z. Huang, Z. Zheng, "Efectos tóxicos combinados de la enrofloxacin y los microplásticos en plantas sumergidas y biopelículas epifitas en aguas con alto contenido de nitrógeno y fósforo," Quimiosfera, vol. 308, p. 136099, 2022.
- [19] Forbes Staff, "La casa hecha con más de 600,000 botellas de plástico," Forbes Centroamérica, 2019. [Online]. Disponible en: <https://forbescentroamerica.com/2019/07/30/la-casa-hecha-con-mas-de-600000-botellas-de-plastico>
- [20] R. Salas, "Construcciones ecológicas hechas con botellas recicladas de PET y vidrio," 2016. [Online]. Disponible en: http://plataforma.responsable.net/sites/default/files/para_publicaciones_0.pdf
- [21] Ancashaldía, "Nuevo Chimbote: Construyen casa ecológica con botellas PET en el A. H. Praderas del Sur," 2020. [Online]. Disponible en: <https://ancashaldia.com/nuevo-chimbote-construyen-casa-ecologica-con-botellas-pet-en-el-a-h-praderas-del-sur/>
- [22] F. Espinoza, "Caracterización de botellas PET para su uso como elementos constructivos de muros de carga," Tesis de Maestría en Proyectos y Edificación Sustentables, ITESO, Tlaquepaque, Jalisco, 2016.
- [23] P. Angumba, "Ladrillos Elaborados Con Plástico Reciclado (PET), Para Mampostería No Portante," Tesis de Magister en Construcciones, Universidad de Cuenca, Cuenca, 2016.
- [24] E. Quevedo, "Influencia De Las Unidades De Albañilería Tipo Pet Sobre Las Características Técnicas Y Económicas De Viviendas Ecológicas Para La Zona De Expansión Del Distrito De Nuevo Chimbote, Ancash," Tesis de Maestro en Gestión Ambiental, Universidad Nacional del Santa, Chimbote, 2017.
- [25] L. Giraldo, "Evaluación De La Vulnerabilidad Sísmica De Las Edificaciones De Albañilería Confinada En La Ciudad De Huaraz - Año 2016," Tesis de Ingeniero Civil, Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo, Huaraz, 2016.
- [26] R. Ramirez, "Vulnerabilidad Sísmica De Las Viviendas Autoconstruidas De Albañilería Confinada De La Ciudad De Recuay-Ancash-2017," Tesis de Ingeniero Civil, Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo, Huaraz, 2018.
- [27] RECOUP, "Plastic Packaging, Recyclability by Design," Peterborough, 2017. ISBN: 978-0-9558399-7-9.
- [28] A. Masi, "Seismic Vulnerability Assessment of Gravity Load Designed R/C Frames," *Bulletin of Earthquake Engineering*, vol. 1, no. 3, pp. 371-395, 2003. ISSN: 1573-1456.
- [29] V. Mastan and S.S. Asad, "Pet Bottle Waste as A Supplement to Concrete Fine Aggregate," *International Journal of Civil Engineering and Technology*, vol. 8, no. 1, pp. 558-568, 2017. ISSN: 0976-6316.
- [30] R. Moreno and J. Bairán, "Análisis del comportamiento sísmico de los edificios de obra de fábrica, típicos del distrito Eixample de Barcelona," "Informes de la Construcción", vol. 63, no. 524, pp. 21-32, 2011. ISSN: 0020-0883.
- [31] J. Oliver, L. Sykes, and B. Isack, "Seismology and the new global tectonics," Tectonophysics, vol. 7, no. 5-6, pp. 527-541, 1969. ISSN: 0040-1951.
- [32] P. Rockers, P. Tugwell, John Rottingen, and T. Barnighausen, "Quasi-experimental study designs series—paper 13: realizing the full potential of quasi-experiments for health research," *Journal of Clinical Epidemiology*, vol. 89, pp. 106-110, 2017. DOI: 10.1016/j.jclinepi.2017.03.016.
- [33] A. Gardner and K. Willey, "Academic identity reconstruction: the transition of engineering academics to engineering education researchers," Studies in Higher Education, vol. 43, no. 2, pp. 234-250, 2018. DOI: 10.1080/03075079.2016.1162779.