

RESEARCH ARTICLE

Resistencia a compresión de plástico PEAD y PP reciclado mezclado con arena.

Eduardo Palma ¹  Michelle Córdova ¹  Daiana Arnold ² 

¹ Universidad Católica de Cuenca, EC 010101 Cuenca, Ecuador

² Universidad Feevale EC 93042-230 Novo Hamburgo, Brasil

✉ Correspondencia: eduardo.palma@ucacue.edu.ec 📞 + 593 984286979

DOI/URL: <https://doi.org/10.53313/gwj81198>

Resumen: La acumulación de residuos plásticos presenta un desafío ambiental significativo. Este estudio investiga el potencial de utilizar plásticos reciclados de polietileno de alta densidad (PEAD) y polipropileno (PP) mezclados con arena como materiales alternativos en la construcción; **Métodos:** Se prepararon muestras cilíndricas con diferentes proporciones de PEAD, PP y arena (0-40%). Se realizaron ensayos de compresión, determinación del módulo de elasticidad y coeficiente de Poisson siguiendo las normas ASTM; **Resultados:** La resistencia a la compresión y el módulo de elasticidad aumentaron significativamente con la adición de arena. El PEAD alcanzó una resistencia máxima de 287.14 kgf/cm² con 40% de arena, un incremento del 31.4% respecto al PEAD puro. El coeficiente de Poisson mostró variaciones con la adición de arena; **Conclusiones:** La incorporación de arena en plásticos reciclados PEAD y PP mejora significativamente sus propiedades mecánicas, sugiriendo su potencial uso en aplicaciones de construcción como una alternativa sostenible a los materiales tradicionales. Estos hallazgos tienen implicaciones prácticas para el desarrollo de materiales de construcción más ecológicos, la reducción de residuos plásticos y el fomento de una economía circular en la industria de la construcción.

Palabras claves: Economía Circular; PEAD; PP; arena; módulo de elasticidad; coeficiente de Poisson; materiales compuestos.

Compressive Strength of Recycled HDPE and PP Plastic Mixed with Sand

Abstract: Background: The accumulation of plastic waste presents a significant environmental challenge. This study investigates the potential of using recycled high-density polyethylene (HDPE) and polypropylene (PP) plastics mixed with sand as alternative construction materials; **Methods:** Cylindrical samples were prepared with different proportions of HDPE, PP, and sand (0-40%). Compression tests, determination of elastic modulus, and Poisson's ratio were performed following ASTM standards; **Results:** Compressive strength and elastic modulus increased significantly with the addition of sand. HDPE reached a maximum strength of 287.14 kgf/cm² with 40% sand, a 31.4% increase compared to pure HDPE. The Poisson's ratio showed variations with the addition of sand; **Conclusions:** The incorporation of sand in recycled HDPE



Cita: Palma, E., Córdova, M., & Arnold, D. (2025). Resistencia a compresión de plástico PEAD y PP reciclado mezclado con arena. *Green World Journal*, 8(1), 1998. <https://doi.org/10.53313/gwj81198>

Received: 23/February/2025
Accepted: 03/March/2025
Published: 16/March/2025

Prof. Carlos Mestanza-Ramón, PhD.
Editor-in-Chief / CaMeRa Editorial
editor@greenworldjournal.com

Editor's note: CaMeRa remains neutral with respect to legal claims resulting from published content. The responsibility for published information rests entirely with the authors.



© 2025 CaMeRa license, Green World Journal. This article is an open access document distributed under the terms and conditions of the license.

Creative Commons Attribution (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>

and PP plastics significantly improves their mechanical properties, suggesting their potential use in construction applications as a sustainable alternative to traditional materials. These findings have practical implications for the development of more environmentally friendly construction materials, reduction of plastic waste, and promotion of a circular economy in the construction industry.

Keywords: Circular Economy; HDPE; PP; sand; modulus of elasticity; Poisson's ratio; composite materials.

1. Introducción

La protección del medio ambiente se ha convertido en una preocupación global apremiante, especialmente en el campo de la ingeniería civil, donde la búsqueda de alternativas de construcción más ecológicas es cada vez más crucial. Tradicionalmente, la industria de la construcción ha dependido en gran medida de materiales como el hormigón, el acero y la madera, los cuales tienen un impacto ambiental significativo en términos de extracción de recursos y emisiones de carbono. En este contexto, la investigación sobre el uso de plásticos reciclados como alternativa viable para la fabricación de elementos estructurales ha ganado un interés considerable en los últimos años.

La acumulación de residuos plásticos, particularmente en embalajes, ha generado problemas ambientales graves debido a la baja tasa de reciclaje y al predominio del polietileno (PE), que constituye más del 50% de estos desechos. Aunque el polietileno de alta densidad (PEAD) se recicla con relativa eficiencia, el reciclaje de PE mixto enfrenta dificultades significativas debido a la contaminación y al bajo rendimiento del material resultante (1,2). Estudios recientes han demostrado el potencial del plástico PEAD reciclado en aplicaciones de construcción, como la fabricación de adoquines, lo que no solo ayuda a reducir los residuos plásticos, sino que también aumenta la durabilidad del material y ofrece una alternativa más ecológica a los materiales tradicionales como el cemento y el asfalto (3). Sin embargo, la investigación sobre el uso de plásticos reciclados mixtos, especialmente la combinación de PEAD y polipropileno (PP), en aplicaciones estructurales aún es limitada.

El PEAD y el PP son ampliamente utilizados en diversas industrias debido a su resistencia y versatilidad, especialmente en envases y tuberías, gracias a su durabilidad y resistencia al calor. No obstante, su uso extendido presenta desafíos ambientales, como la acumulación de residuos y la migración de sustancias químicas, lo que subraya la necesidad de mejorar su reciclaje y manejo sostenible (2,4). La transición hacia una economía circular en el sector de los plásticos es urgente, y los esfuerzos se centran en aumentar la reciclabilidad y reutilización de estos materiales (5,6).

A pesar de los avances en el aumento del contenido reciclado en diversos productos, el reciclaje de plásticos aún enfrenta desafíos significativos debido a la contaminación cruzada y la degradación de propiedades (7–9). La integración de plásticos reciclados en aplicaciones como membranas y ligantes asfálticos ha demostrado ser prometedora (10–12), pero existe una brecha de conocimiento en cuanto a su uso en elementos estructurales que requieren una resistencia mecánica significativa. Estos esfuerzos optimizan la sostenibilidad de los materiales reciclados al abordar problemas como la degradación y la contaminación cruzada (13–15).

En este contexto, el presente estudio tiene como objetivo investigar el potencial de utilizar plásticos reciclados PEAD y PP, mezclados con arena, como materiales alternativos en la construcción, con un enfoque específico en su resistencia a la compresión y otras propiedades mecánicas relevantes. Esta investigación busca abordar la brecha de conocimiento existente sobre el comportamiento mecánico de estos materiales compuestos y su viabilidad para aplicaciones estructurales.

Para lograr este objetivo, se llevará a cabo un estudio experimental exhaustivo que incluirá la preparación de muestras con diferentes proporciones de PEAD, PP y arena, y la realización de ensayos de compresión, determinación del módulo de elasticidad y coeficiente de Poisson siguiendo las normas ASTM. Los resultados de este estudio tienen el potencial de proporcionar información valiosa sobre la viabilidad de utilizar estos materiales compuestos en aplicaciones de construcción, contribuyendo así a la reducción de residuos plásticos y al desarrollo de prácticas de construcción más sostenibles.

2. Materiales y métodos

En este estudio se empleó una metodología combinada de investigación experimental, bibliográfica y de trabajo de campo para elaborar y analizar 75 probetas de materiales compuestos con diversas proporciones de plástico PEAD, PP y arena. Debido a la falta de normativas específicas para la determinación de las propiedades de estos materiales compuestos, se adaptaron las normativas ASTM (16–20) utilizadas para la fabricación de concreto y las normas INEN (21–24) para la caracterización del material granular.

2.1 Materiales

Plásticos reciclados

Se utilizaron dos tipos de plásticos reciclados:

- Polietileno de Alta Densidad (PEAD), designado como plástico tipo 2
- Polipropileno (PP), designado como plástico tipo 5

Se recolectaron y clasificaron 120 kg de residuos sólidos plásticos, destinando 60 kg a cada tipo de plástico.

Arena

Se utilizó arena como agregado fino. El análisis granulométrico de la arena mostró una distribución adecuada que cumple con los estándares de la normativa ASTM C33. El módulo de finura de la arena es de 2,42.

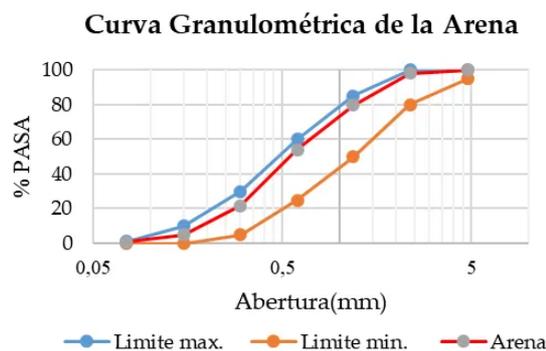


Figura 1. Curva Granulométrica de la arena

2.2 Preparación de muestras

Procesamiento de plásticos reciclados.

- Lavado: Los plásticos PEAD y PP se lavaron a fondo para eliminar residuos, polvo y lodo.
- Corte: Los plásticos se cortaron en pequeños pedazos rectangulares o cuadrados.
- Trituración: Se utilizó una trituradora eléctrica para reducir el tamaño de los plásticos, aplicando medidas de seguridad como el uso de audífonos y mascarillas.



Figura 2. Procesamiento de plásticos reciclados

Fabricación de probetas

- Extrusión de perfiles: Se fabricaron 15 tubos cilíndricos utilizando un molde metálico de 10 cm de diámetro y 128 cm de longitud (ver figura 3). El proceso consistió en fundir el plástico con las diversas dosificaciones de arena para formar los perfiles cilíndricos:
 - 5 cilindros de PEAD reciclado con porcentajes de arena de 0%, 10%, 20%, 30%, y 40%
 - 5 cilindros de PP reciclado con porcentajes de arena de 0%, 10%, 20%, 30%, y 40%
 - 5 cilindros de mezcla homogénea de PEAD y PP con porcentajes de arena de 0%, 10%, 20%, 30%, y 40%
- Corte de probetas: Los tubos cilíndricos se cortaron para obtener probetas con una relación altura: diámetro de 2:1 (Ver figura 3). De cada tubo cilíndrico se obtuvieron 5 probetas, resultando en un total de 75 probetas cilíndricas de 10 cm de diámetro y 20 cm de altura. Para garantizar la uniformidad, se descartaron los bordes de los cilindros fundidos durante el proceso de corte.



Figura 3. Fabricación de probetas

2.3 Ensayos realizados

Se utilizó arena como agregado fino, cuya caracterización se realizó mediante un análisis de sus propiedades físicas. El análisis granulométrico se llevó a cabo siguiendo la norma NTE INEN 696 [21] y se verificó que la distribución cumpliera con los estándares de la normativa ASTM C33 [20]. Además, se determinaron la densidad aparente y los vacíos de la arena según ASTM C29 [18] y NTE INEN 858 [22], mientras que la densidad relativa (gravedad específica) y la absorción se evaluaron conforme a ASTM C128 [19] y NTE INEN 0856 [23]. El muestreo de la arena se realizó de acuerdo con NTE INEN 695 [24] para garantizar representatividad. Estas propiedades fueron fundamentales para la preparación de las probetas, cuyos ensayos de compresión y determinación del módulo de elasticidad y coeficiente de Poisson se realizaron siguiendo ASTM C39 [16] y ASTM C469 [17], respectivamente. El módulo de finura de la arena fue de 2,42, confirmando su idoneidad para las mezclas.

Se realizaron sobre las probetas cilíndricas los siguientes ensayos:

Densidad de los materiales compuestos

Se determinó la densidad de las probetas de PEAD, PP y su mezcla con diferentes porcentajes de arena.

Ensayo de compresión

Se realizó el ensayo de compresión siguiendo la norma ASTM C39. La velocidad de carga aplicada fue de 0.25 ± 0.05 MPa/s. Ver figura 4

Determinación del módulo de elasticidad y coeficiente de Poisson

Se siguió la norma ASTM C469. Se aplicó una carga axial gradual hasta la falla de las probetas, registrando las deformaciones transversales y longitudinales con deformímetros montados en anillos sobre las probetas.



Figura 4. Ensayos realizados

3. Resultados

A continuación, se presenta una tabla resumen de los diversos valores encontrados para la densidad, resistencia a compresión, módulo de elasticidad y coeficiente de Poisson de las distintas probetas cilíndricas con los diversos porcentajes de arena y tipos de material.

Tabla 1 Propiedades del PEAD con diferentes porcentajes de arena

% Arena	Densidad (kg/m ³)	Resistencia a Compresión (MPa)	Módulo de Elasticidad (GPa)	Coefficiente de Poisson
0%	690	21,85	0,61	0,29
10%	740	22,01	0,67	0,22
20%	810	21,97	0,79	0,29
30%	980	25,06	0,75	0,51
40%	1000	28,71	0,99	0,46

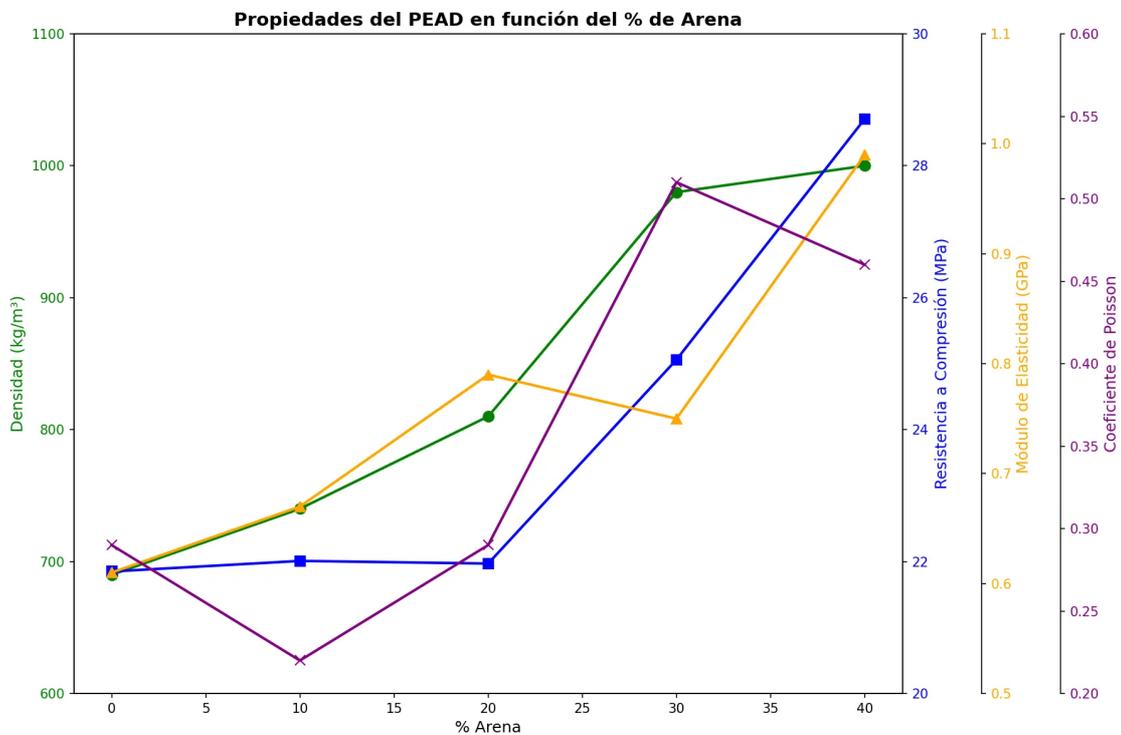


Figura 5. Propiedades del PEAD en función del % de Arena

Tabla 2 Propiedades del PP con diferentes porcentajes de arena

% Arena	Densidad (kg/m ³)	Resistencia a Compresión (MPa)	Módulo de Elasticidad (GPa)	Coefficiente de Poisson
0%	710	15,39	0,53	0,32
10%	800	17,30	0,71	0,47
20%	890	17,76	0,88	0,40
30%	980	17,45	0,92	0,43
40%	1270	22,01	1,10	0,38

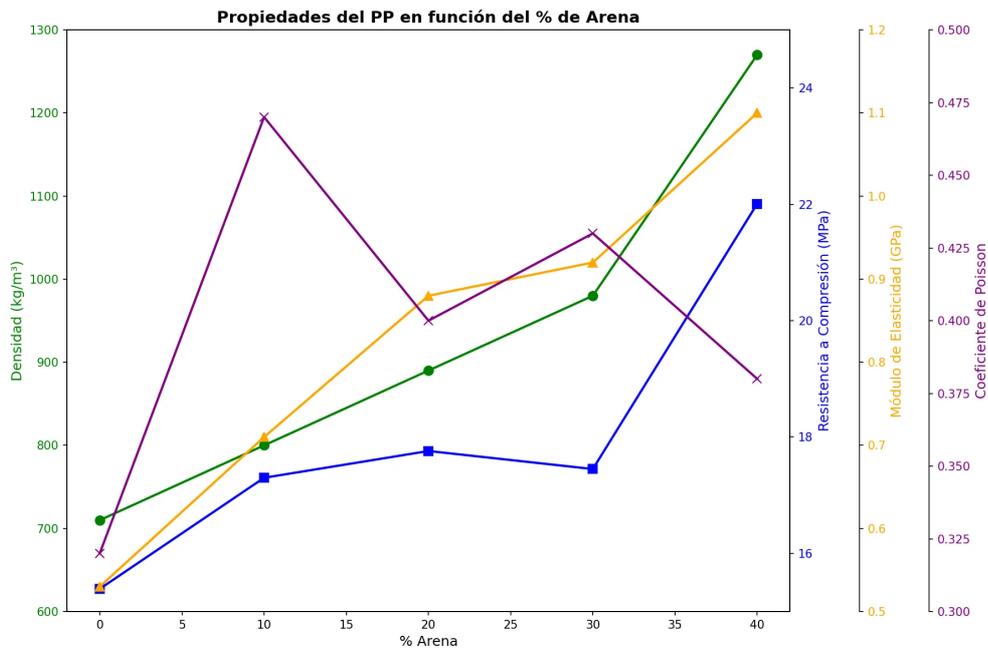


Figura 6. Propiedades del PP en función del % de Arena

Tabla 3 Propiedades de la mezcla PEAD+PP con diferentes porcentajes de arena

% Arena	Densidad (kg/m³)	Resistencia a Compresión (MPa)	Módulo de Elasticidad (GPa)	Coeficiente de Poisson
0%	690	18,46	0,50	0,33
10%	750	18,88	0,76	0,39
20%	860	20,99	0,74	0,50
30%	980	21,24	0,78	0,51
40%	1050	24,43	0,97	0,47

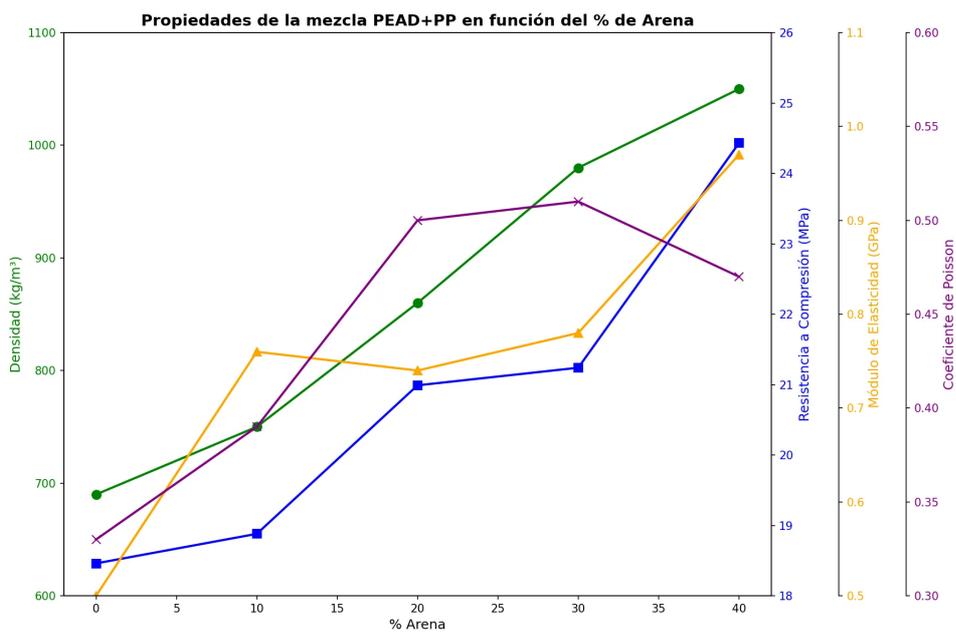
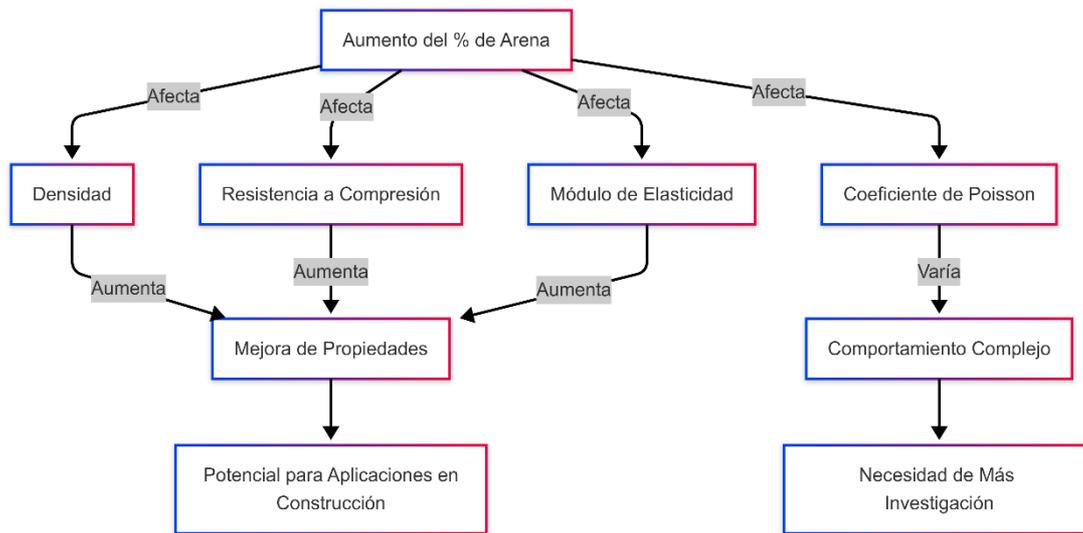


Figura 6. Propiedades de la mezcla PEAD + PP en función del % de Arena

4. Discusión

A partir de los datos presentados en las Figuras 4, 5 y 6, es posible identificar patrones claros sobre el impacto de la adición de arena en las propiedades mecánicas y físicas de los materiales plásticos reciclados PEAD, PP y su mezcla PEAD+PP. El análisis de cada propiedad se detalla a continuación:

1. **Densidad:** En todos los materiales, la densidad incrementa con el aumento del porcentaje de arena. Esto es especialmente notable en el PP, que alcanza una densidad de 1270 kg/m^3 con un 40% de arena, sugiriendo una reducción en la porosidad y una mejor cohesión en la matriz del material. En el caso de la mezcla PEAD+PP, también se observa un aumento constante, lo que refleja la influencia de la arena como refuerzo. Este incremento en densidad es común al introducir partículas minerales, como lo confirman estudios previos, y sugiere una mayor compactación y resistencia del material.
2. **Resistencia a Compresión:** La resistencia a compresión también incrementa significativamente con la adición de arena. El PEAD alcanza una resistencia máxima con un incremento del 31.4% respecto al material sin arena. Este aumento puede atribuirse a la disminución de porosidad y a una mejor distribución de cargas en la matriz del material compuesto. En particular, la mezcla PEAD+PP presenta un comportamiento intermedio entre los materiales individuales, lo cual sugiere una sinergia al combinar ambos polímeros, alcanzando niveles de resistencia adecuados para ciertas aplicaciones en construcción.
3. **Módulo de Elasticidad:** El aumento en el módulo de elasticidad es mayor en el PP, que logra un incremento del 109.7% al alcanzar 1.10 GPa con un 40% de arena. Esto implica que el material se vuelve más rígido, lo cual puede ser ventajoso en aplicaciones donde la deformación debe ser limitada. En el PEAD, se observa una ligera disminución en el módulo de elasticidad al 30% de arena, posiblemente debido a una distribución no uniforme de las partículas o a la formación de aglomeraciones que interfieren con la homogeneidad de la matriz.
4. **Coefficiente de Poisson:** La variabilidad observada en el coeficiente de Poisson con diferentes porcentajes de arena constituye un hallazgo relevante de este estudio. En el caso del PEAD, el coeficiente aumenta significativamente al 30% de arena (0,51) y luego disminuye ligeramente al 40% (0,46). Un comportamiento similar se observa en la mezcla PEAD+PP, donde el valor aumenta progresivamente hasta el 30% de arena (0,51) para luego descender (0,47) con el 40%. El PP muestra un patrón diferente, con valores que oscilan sin una tendencia clara. Esta variabilidad no muestra una correlación lineal con el porcentaje de arena, lo que sugiere que existen factores complejos que influyen en la deformación transversal de estos materiales compuestos. Desde un punto de vista práctico, estos cambios en el coeficiente de Poisson tienen implicaciones directas en aplicaciones donde la deformación lateral bajo carga es un factor crítico, como en elementos sometidos a compresión en sistemas constructivos donde se requiere un control preciso de las deformaciones. Este comportamiento no lineal del coeficiente de Poisson evidencia la necesidad de estudios más profundos y específicos para comprender mejor los mecanismos que gobiernan las deformaciones transversales en estos materiales compuestos, posiblemente mediante técnicas de caracterización avanzadas que permitan correlacionar las propiedades macroscópicas observadas con los fenómenos físicos subyacentes.



Implicaciones prácticas:

Los hallazgos de este estudio ofrecen varias implicaciones prácticas para el uso de materiales plásticos reciclados (PEAD, PP y su mezcla) combinados con arena en la industria de la construcción:

- **Mejora de Propiedades Mecánicas:** El aumento de la resistencia a la compresión y del módulo de elasticidad sugiere que estos materiales compuestos pueden ser adecuados para aplicaciones en componentes de construcción no estructurales o semi-estructurales, como en paneles de revestimiento, bloques de soporte y elementos de pavimento.
- **Optimización de Mezclas para Aplicaciones Específicas:** La mezcla de PEAD y PP muestra propiedades intermedias que ofrecen un balance entre rigidez y resistencia. Este comportamiento sugiere que se pueden ajustar las proporciones de PEAD, PP y arena para diseñar compuestos que cumplan con los requisitos específicos de diferentes aplicaciones en construcción, optimizando así la relación costo-beneficio.
- **Sostenibilidad y Economía Circular:** El uso de plásticos reciclados combinado con arena, un material abundante y de bajo costo, no solo mejora las propiedades del material, sino que también contribuye a la sostenibilidad. La reducción de residuos plásticos a través de su reutilización en materiales de construcción ofrece un enfoque valioso para el desarrollo de prácticas constructivas más sostenibles, contribuyendo a la economía circular.
- **Consideraciones en el Diseño:** La variabilidad observada en el coeficiente de Poisson indica que este parámetro puede cambiar significativamente con la cantidad de arena, lo que debe considerarse al diseñar componentes que dependan de la deformación lateral o donde las deformaciones transversales puedan influir en el desempeño del material bajo carga. Esto es relevante en aplicaciones donde el comportamiento elástico es crítico.
- **Potencial Económico:** La posibilidad de mejorar las propiedades mecánicas de plásticos reciclados mediante la adición de arena abre una oportunidad económica para producir materiales compuestos con menor costo en aplicaciones de construcción. Estos compuestos pueden convertirse en una opción viable y económica en aplicaciones que demandan resistencia y rigidez sin requerir materiales completamente estructurales.

Estos resultados y sus implicaciones prácticas abren nuevas oportunidades para el uso de materiales compuestos de plásticos reciclados en la construcción, promoviendo un enfoque de sostenibilidad

y eficiencia económica. Sin embargo, para optimizar su rendimiento en aplicaciones más exigentes, sería beneficioso realizar estudios adicionales de caracterización microestructural, como microscopía electrónica de barrido, para entender mejor la distribución e interacción de las partículas de arena en la matriz polimérica.

5. Conclusión

Este estudio analizó las propiedades mecánicas de materiales compuestos fabricados con plásticos reciclados (PEAD y PP) mezclados con distintos porcentajes de arena, y derivó las siguientes conclusiones:

1. Mejora de las propiedades mecánicas: La adición de arena en los plásticos reciclados (PEAD y PP) mejoró significativamente sus propiedades mecánicas, especialmente en resistencia a la compresión y módulo de elasticidad. En el caso del PEAD reciclado, se alcanzó una resistencia a la compresión de 28.71 MPa con un 40% de arena, lo que representa un incremento del 31.4% respecto al PEAD sin arena (Figura 4). Estos resultados sugieren el potencial de estos compuestos como alternativas sostenibles para aplicaciones en construcción no estructurales o semi-estructurales.
2. Comportamiento sinérgico de mezclas: La mezcla de PEAD y PP con arena mostró un comportamiento mecánico más uniforme y predecible que los materiales individuales. Este comportamiento sinérgico permite diseñar mezclas optimizadas para aplicaciones específicas, ampliando así el rango de uso de estos materiales reciclados en la construcción. La mezcla PEAD+PP presentó un aumento equilibrado en sus propiedades, lo que resalta su versatilidad (Figura 6).
3. Incremento en densidad: Con la adición de arena, la densidad de los materiales compuestos aumentó de manera significativa, alcanzando valores de 1270 kg/m³ en el PP y 1050 kg/m³ en la mezcla PEAD+PP al 40% de arena (Figuras 5 y 6). Este aumento indica una reducción en la porosidad y sugiere que la arena actúa como un refuerzo efectivo en la matriz polimérica, contribuyendo a mejorar las propiedades mecánicas.
4. Variabilidad del coeficiente de Poisson: Se observaron variaciones en el coeficiente de Poisson con el incremento de arena, lo que sugiere cambios en la microestructura del material y en la interacción entre la arena y la matriz polimérica. Esta variabilidad es relevante para el diseño de aplicaciones en las que el coeficiente de Poisson es crítico, y se recomienda realizar estudios adicionales para comprender mejor su comportamiento (Figuras 4, 5 y 6).
5. Implicaciones para la sostenibilidad: Este estudio demuestra el potencial de utilizar plásticos reciclados mezclados con arena como una alternativa sostenible a los materiales de construcción tradicionales. La reducción de residuos plásticos y el fomento de una economía circular en la construcción son beneficios clave de esta aplicación, que además disminuye la dependencia de recursos vírgenes.
6. Optimización económica: La incorporación de arena, un material de bajo costo, mejora las propiedades mecánicas de estos materiales compuestos, haciéndolos viables para ciertas aplicaciones de construcción. La combinación de sostenibilidad y rendimiento convierte a estos materiales en una opción económica y atractiva para aplicaciones específicas.
7. Limitaciones y áreas de investigación futura: Aunque los resultados son prometedores, se identifican áreas clave para futuras investigaciones:
 - o Evaluación de la durabilidad a largo plazo y la resistencia a la intemperie de estos compuestos.

- Análisis de propiedades térmicas y acústicas para aplicaciones en construcción.
- Estudios microestructurales para comprender mejor la interacción entre arena y matriz polimérica.
- Evaluación de las propiedades de fractura y fatiga bajo cargas cíclicas.
- Desarrollo de métodos de procesamiento optimizados para la producción en gran escala.

En resumen, este estudio proporciona evidencia del valor de los compuestos de plásticos reciclados y arena para la industria de la construcción. Los hallazgos obtenidos sientan las bases para futuros desarrollos en materiales de construcción sostenibles, apoyando la economía circular y abordando los desafíos ambientales relacionados con los residuos plásticos y la demanda de materiales de construcción más ecológicos.

Contribución de autores: E.P. contribuyó con la conceptualización, metodología, supervisión y revisión-edición; M.C. aportó en metodología, investigación (preparación y ensayo de muestras) y redacción del borrador original; D.A. participó en la revisión-edición del manuscrito

Financiamiento: Esta investigación fue financiada por la Universidad Católica de Cuenca bajo el proyecto PIC5P23-31 titulado "Elaboración de estructuras plásticas, mobiliario urbano, ropa ecológica, y calzado a través de la implementación de Economía Circular."

Conflictos de interés: Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Referencias

1. Shaker M, Hamdani SS, Muzata TS, Rabnawaz M. Driving selective upcycling of mixed polyethylene waste with table salt. *Scientific Reports* 2024 14:1 [Internet]. 2024 Jun 22 [cited 2024 Aug 24];14(1):1–11. Available from: <https://www.nature.com/articles/s41598-024-63482-1>
2. Núñez SS, Ortuño N, Fernández-Durán S, Moltó J, Conesa JA. Analysis and removal of bisphenols in recycled plastics using polyethylene glycol. *Scientific Reports* 2024 14:1 [Internet]. 2024 Jun 4 [cited 2024 Aug 24];14(1):1–11. Available from: <https://www.nature.com/articles/s41598-024-63800-7>
3. Saraswat P, Singh B. Utilization of recycled concrete aggregates in LDPE-bonded cementless paver blocks. *Constr Build Mater*. 2024 Mar 15;419:135467.
4. Zhang Z, Zhang X, Huang W, Zheng X, Ding B, Wang X. Breathable and wearable graphene/waterborne polyurethane coated regenerated polyethylene terephthalate fabrics for motion sensing and thermal therapy. *Discover Nano* [Internet]. 2024 Dec 1 [cited 2024 Aug 24];19(1):1–14. Available from: <https://link.springer.com/article/10.1186/s11671-024-04004-w>
5. Esmaili M, Ara I, Ippolitov V, Rissanen T, Anugwom I. Unlocking sustainable solutions: Harnessing recycled polyester from waste polyester/cotton blended textiles for membrane development. *Chem Eng Sci*. 2024 Oct 5;298:120367.
6. Gonçalves M, Freire F, Garcia R. Material flow analysis and circularity assessment of plastic packaging: An application to Portugal. *Resour Conserv Recycl*. 2024 Oct 1;209:107795.
7. Khaki A, Gerlach C, Ragaert K, Fiorio R. Root causes of post-consumer high-density polyethylene failing in new bottles. *Resour Conserv Recycl*. 2024 Oct 1;209:107776.
8. Tosarkani BM, Amin SH, Ghiasvand MR. Designing a sustainable plastic bottle reverse logistics network: A data-driven optimization approach. *Expert Syst Appl*. 2024 Oct 1;251:123918.
9. Krämer J, Guedes de la Cruz G del C, Kern W, Roitner J, Witschnigg A, Rittmannsberger F, et al. Increasing the melt viscosity of post-consumer recycled polypropylene via E-Beam techniques. *Radiation Physics and Chemistry*. 2024 Sep 1;222:111846.

10. Oyelere A, Wu S, Hsiao KT, Kang MW, Dizbay-Onat M, Cleary J, et al. Evaluation of cracking susceptibility of asphalt binders modified with recycled high-density polyethylene and polypropylene microplastics. *Constr Build Mater*. 2024 Aug 9;438:136811.
11. Geier J, Barretta C, Hinczica J, Haar B, Bredács M, Witschnigg A, et al. Feasibility study on the production of low melt flow rate recycled polypropylene from postconsumer waste. *J Appl Polym Sci* [Internet]. 2024 Aug 10 [cited 2024 Aug 24];141(30):e55694. Available from: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/app.55694>
12. Liu YQ, Li ZK, Zhang HR, Wang ZW, Hu CY. Effect of recycled polypropylene on migration of six processing aids in polypropylene film to milk. *Food Packag Shelf Life*. 2024 Jul 1;44:101316.
13. Fan C, Huang YZ, Lin JN, Li J. Microplastic constituent identification from admixtures by Fourier-transform infrared (FTIR) spectroscopy: The use of polyethylene terephthalate (PET), polyethylene (PE), polypropylene (PP), polyvinyl chloride (PVC) and nylon (NY) as the model constituents. *Environ Technol Innov*. 2021 Aug 1;23:101798.
14. Khabbaz HS, Demets R, Gahleitner M, Duscher B, Stam R, Dimitrova A, et al. Rheological insights into the degradation behavior of PP/HDPE blends. *Polym Degrad Stab*. 2024 Jul 1;225:110819.
15. Angulo C, Shackelford LR, Ning H, Pillay S. Comparative study on the mechanical behaviors of compression molded, additively manufactured, and injection molded recycled carbon fiber reinforced rHDPE composites. *Compos B Eng*. 2024 Apr 15;275:111323.
16. ASTM International. ASTM C39/C39M-23: Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. West Conshohocken, PA: ASTM International; 2023 [cited 2024 May 14]. Available from: https://www.astm.org/c0039_c0039m-23.html
17. ASTM International. ASTM C469/C469M-22: Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression. West Conshohocken, PA: ASTM International; 2022 [cited 2024 May 14]. Available from: https://www.astm.org/c0469_c0469m-22.html
18. ASTM International. ASTM C29/C29M-23: Standard Test Method for Bulk Density ("Unit Weight") and Voids in Aggregate. West Conshohocken, PA: ASTM International; 2023 [cited 2024 May 12]. Available from: https://www.astm.org/c0029_c0029m-23.html
19. ASTM International. ASTM C128/C128M-22: Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate. West Conshohocken, PA: ASTM International; 2022 [cited 2024 May 13]. Available from: https://www.astm.org/c0128_c0128m-22.html
20. ASTM International. ASTM C33/C33M-23: Standard Specification for Concrete Aggregates. West Conshohocken, PA: ASTM International; 2023 [cited 2024 May 14]. Available from: https://www.astm.org/c0033_c0033m-23.html
21. Instituto Ecuatoriano de Normalización. NTE INEN 696:2016: Áridos. Análisis Granulométrico en los Áridos, Fino y Grueso. Quito: Instituto Ecuatoriano de Normalización; 2016 [cited 2024 May 12]. Available from: <https://www.normalizacion.gob.ec/normas-tecnicas-ecuatorianas/>
22. Instituto Ecuatoriano de Normalización. NTE INEN 858:2010: Áridos. Determinación de la Masa Unitaria (Peso Volumétrico) y el Porcentaje de Vacíos. Quito: Instituto Ecuatoriano de Normalización; 2010 [cited 2024 May 12]. Available from: <https://www.normalizacion.gob.ec/normas-tecnicas-ecuatorianas/>
23. Instituto Ecuatoriano de Normalización. NTE INEN 0856:2010: Áridos. Determinación de la Densidad, Densidad Relativa (Gravedad Específica) y Absorción del Árido Fino. Quito: Instituto Ecuatoriano de Normalización; 2010 [cited 2024 May 13]. Available from: <https://www.normalizacion.gob.ec/normas-tecnicas-ecuatorianas/>
24. Instituto Ecuatoriano de Normalización. NTE INEN 695:2010: Áridos. Muestreo. Quito: Instituto Ecuatoriano de Normalización; 2010 [cited 2024 May 6]. Available from: <https://www.normalizacion.gob.ec/normas-tecnicas-ecuatorianas/>



© 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>