

Impact of adding PET fibers to concrete

Lucrecia Moreno Alcívar, Ph.D.^{1,2}, Rebeca Castro Valle, Ing.¹, Gricelda Herrera Franco, Ph.D.¹, Mariela Muñoz Rosado, M.Sc.¹, Erick Altamirano Espinoza, Ing.¹

¹Universidad Estatal Península de Santa Elena, Ecuador, lmoreno@upse.edu.ec, rebeca.castrovalle@upse.edu.ec, grisherrera@upse.edu.ec, mmunoz2190@upse.edu.ec, erick.altamiranoespinoza@upse.edu.ec,

²Universidad Nacional de Tumbes, Perú.

Abstract– *The indiscriminate use of plastics has led to an environmental crisis due to inadequate disposal and prolonged degradation time. Among them, polyethylene terephthalate (PET) is widely used in food packaging and textiles, significantly contributing to plastic waste generation. This study investigates the incorporation of PET fibers into concrete as a sustainable solution within the framework of the circular economy. Experimental tests were conducted to evaluate the mechanical properties of concrete with PET fiber additions at different dosages (2%, 3%, 4%, and 5% relative to cement weight) and in two forms (smooth fibers and accordion-shaped fibers). The results showed that adding 2% smooth PET fibers increased compressive strength by 3% and flexural strength by 12.6%, while higher percentages negatively affected material resistance. The findings highlight the potential of PET-reinforced concrete as a viable alternative to reduce plastic waste and enhance material performance in construction.*

Keywords– *Plastic waste, PET, Concrete, Material Reuse, Recycling.*

Incidencias de la adición de fibras PET en el concreto

Lucrecia Moreno Alcívar, Ph.D.^{1,2}, Rebeca Castro Valle, Ing.¹, Gricelda Herrera Franco, Ph.D.¹, Mariela Muñoz Rosado, M.Sc¹, Erick Altamirano Espinoza, Ing.¹

¹Universidad Estatal Península de Santa Elena, Ecuador, lmoreno@upse.edu.ec, rebeca.castrovalle@upse.edu.ec, grisherrera@upse.edu.ec, mmunoz2190@upse.edu.ec, erick.altamiranoespinoza@upse.edu.ec,

²Universidad Nacional de Tumbes, Perú.

Resumen—El uso indiscriminado de los plásticos ha generado una crisis ambiental debido a su inadecuada disposición y su prolongado tiempo de degradación. Entre estos, el tereftalato de polietileno (PET) se utiliza ampliamente en envases de alimentos y textiles, contribuyendo significativamente a la generación de residuos plásticos. Este estudio investiga la incorporación de fibras PET en el concreto como una solución sostenible dentro del marco de la economía circular. Se realizaron ensayos experimentales para evaluar las propiedades mecánicas del concreto con adición de fibras PET en diferentes dosificaciones (2%, 3%, 4% y 5% en relación con el peso del cemento) y en dos formas (fibras lisas u fibras dobladas tipo acordeón). Los resultados mostraron que la adición del 2% de fibras lisas de PET incrementó la resistencia a la compresión en un 3% y la resistencia a la flexión en un 12,6%, mientras que porcentajes mayores afectaron negativamente la resistencia del material. Los hallazgos resaltan el potencial del concreto reforzado con PET como una alternativa viable para reducir los residuos plásticos y mejorar el desempeño del material en la construcción.

Palabras clave—Residuos plásticos, PET, Hormigón, Reutilización de Materiales, Reciclaje.

I. INTRODUCCIÓN

Los plásticos han llegado a ser un componente indispensable y fundamental en nuestra vida cotidiana [1]. En 1869 John Wesley Hyatt inventó el primer polímero sintético, [2], posteriormente en 1907 Leo Hendrik Baekeland produjo el primer plástico sintético, la baquelita, [3], [4], [5]. Sin embargo, fue hasta 1941 donde J. R. Whinfield y J.T. Dickinson logran patentar el Tereftalato de polietileno como un polímero para fibra [6].

El término "plásticos" abarca una amplia gama de materiales poliméricos sintéticos obtenidos a partir de hidrocarburos fósiles [7], [8], este es ampliamente utilizado en diversas industrias gracias a su durabilidad, facilidad de moldeo, bajo costo de producción, ligereza y versatilidad [9], [10].

Desde 1950, la industria del plástico ha crecido rápidamente, tanto que en las dos últimas décadas su fabricación se duplicó [11], llegando a producir 460 millones de toneladas en el 2019 [12]. En el 2010, 192 naciones costeras produjeron 275 millones de toneladas de residuos plásticos, de los cuales 12,7 millones (4,4%) terminaron en los océanos [13], [14] y se prevé que para el 2050, la contaminación plástica supere la cantidad de los peces [15].

Debido a su corta vida útil y al lento proceso de descomposición, los productos plásticos pueden tardar cientos a miles de años en degradarse [16], [17], [18]. El crecimiento poblacional [19], el uso desmedido del plástico y su inadecuada gestión como residuo, son los principales motores de la contaminación, la pérdida de biodiversidad, la destrucción del hábitat y el cambio climático [20], [21], [22].

A nivel mundial se ha reciclado aproximadamente el 9% de desechos plásticos, incinerado el 12% y desechados al ecosistema el 79% [23]; esta gran acumulación de desechos [24] libera toxinas al aire y al suelo, contamina las aguas subterráneas y pone en riesgo la vida marina [25], [26]. En este contexto, se ha identificado que aproximadamente 700 especies marinas interactúan con los desechos plásticos mediante la ingestión, el enredo y/o la asfixia [27].

El tereftalato de polietileno (PET), es utilizado en la fabricación de envases para alimentos y textiles debido a su resistencia, bajo peso y capacidad para conservar productos alimenticios [28], [29]. Sin embargo, la producción de una botella de PET involucra la extracción y procesamiento de petróleo, liberando gases de efecto invernadero y contaminando el aire [30].

El aumento del uso de PET y su incorrecta disposición final han generado una crisis ambiental significativa, con un impacto negativo en el entorno [31], [32]. La implementación de la regla de las 3R es conocida por promover prácticas eco-amigables en sectores como la industria de la construcción, contribuyendo así al desarrollo sostenible [33], [34], el reciclaje es una herramienta clave para reducir los residuos generados, mediante la recolección y procesamiento de materiales para obtener nuevas fuentes de materia prima [35], [36].

Por otra parte, el concreto llamado también hormigón hidráulico [37] es el material más utilizado en proyectos de infraestructuras, que desde el punto de vista económico es difícil sustituirlo por cualquier otro material [38], además es importante considerar que la industria de la construcción es el tercer contaminante a nivel mundial [39].

En este contexto, la incorporación de fibras de PET recicladas en la fabricación de concreto se presenta como una estrategia innovadora en el campo de la construcción de edificaciones sostenibles [40], [41]. No solo proporciona una solución para reducir la acumulación de residuos plásticos, sino

que también puede mejorar las propiedades mecánicas del concreto [42], [43].

Esta problemática ha motivado el desarrollo de tecnologías y procesos constructivos sostenibles que no solo mitigan la contaminación, sino que también buscan preservar el equilibrio ecológico y asegurar recursos para las futuras generaciones [44], [45]. De esta manera, se impulsa la adopción de materiales más sostenibles, reduciendo la huella ambiental y contribuyendo a un enfoque más responsable hacia el manejo de residuos plásticos [46], lo que a su vez contribuye a una construcción alineada con los principios de la economía circular [47].

La economía circular (EC) se considera como una solución a problemas como la acumulación de residuos, la escasez de recursos y la búsqueda de sostenibilidad económica [48], [49]. La EC sugiere transformar los sistemas económicos tradicionales, que operan de manera lineal, en sistemas que se enfocan en la reutilización, remanufactura y reciclaje de materiales [50], [51]. Este enfoque valora los materiales dentro de un ciclo cerrado, permitiendo un uso más eficiente de los recursos naturales, reduciendo la contaminación y manteniendo el crecimiento económico [51], [52].

Como referencia de otras investigaciones se destaca el estudio “Mechanical and physical properties and morphology of concrete containing plastic waste as aggregate” el cual se basa en el reemplazo del 25% de residuos plásticos PVC, como agregados en el diseño de concreto, utilizando cemento de uso común. Los resultados indicaron una disminución del 26% en la resistencia del diseño. No obstante, el uso de agregados plásticos aumentó la ductilidad y mejoró el aislamiento térmico del hormigón, haciéndolo útil en aplicaciones ligeras y energéticamente eficientes [53].

Foti en su investigación reportó que la incorporación de tiras de PET reciclado tanto en forma laminar como circular, contribuyen de manera notable a mejorar la ductilidad y la resistencia al impacto del concreto. Sin embargo, advirtió que una dosificación superior al 1% reduce la trabajabilidad de la mezcla de forma considerable [54]. Manaf identificó que una dosificación del 1% ofrece un mejor desempeño mecánico, ya que valores superiores tienden a generar una distribución inadecuada de las fibras en la matriz cementicia, lo cual afecta de manera negativa la resistencia del material [55].

Por su parte, Zulkernain [56] mediante una revisión sistemática de más de 160 estudios, subraya que variables como la forma, el tamaño y el volumen de las fibras plásticas influyen directamente en la adherencia, la compactación y la formación de vacíos en el concreto, afectando así sus propiedades mecánicas y su durabilidad.

Asimismo, Lee [57] evidenció que la adición de 3.84 kg/m^3 de fibras de PET reciclado en mezclas destinadas a la reparación de pavimentos mejora notablemente la resistencia a la compresión, tracción, flexión y a la penetración de iones de cloruro. No obstante, dosificaciones superiores a esa cantidad resultaron en un desempeño inferior debido a la pérdida de homogeneidad en la mezcla.

Este estudio se enmarca dentro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la Agenda 2030 [58], alineándose particularmente con el ODS 12 (Producción y Consumo Responsables), al promover la reutilización de plásticos y la reducción de residuos; el ODS 9 (Industria, Innovación e Infraestructura), al impulsar el desarrollo de materiales sostenibles para la construcción mediante la incorporación de plásticos reciclados en el concreto; y el ODS 13 (Acción por el Clima), al contribuir a la mitigación de los efectos ambientales de los residuos plásticos y promover una economía circular que optimice el uso de recursos naturales, favoreciendo la sostenibilidad en el sector de la construcción.

El objetivo principal de esta investigación es optimizar el uso del plástico en el concreto, aplicando los criterios de la economía circular mediante el reciclaje y la reutilización del PET. Para ello, se incorpora este material en la dosificación del hormigón, con el fin de evaluar experimentalmente su resistencia a la compresión y flexión.

II. METODOLOGÍA

Este estudio explora la influencia de la adición de PET en las propiedades mecánicas del concreto, utilizando fibras de 50 mm de largo y 3mm de ancho en dos tipos i) fibras lisas; ii) fibras dobladas tipo acordeón, enfocada en ofrecer soluciones prácticas para la industria de la construcción mediante la optimización de materiales sostenibles.

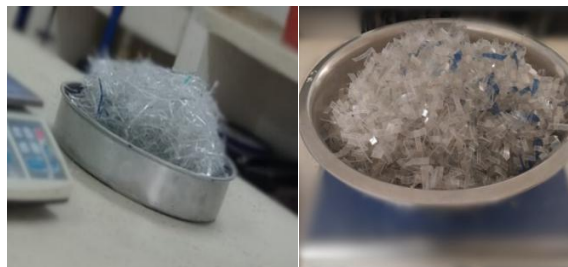


Fig. 1 Tipos de Fibras.

Se desarrolla con un enfoque explicativo [59], orientado a establecer relaciones casuales entre la incorporación de PET y el desempeño del concreto, utilizando un diseño experimental [60] alineado a las normativas ASTM y ACI. Siguiendo el método hipotético-deductivo [61], permitiendo un análisis riguroso de su efecto. El enfoque cuantitativo [62] sustenta la medición de las propiedades como la resistencia a la compresión y flexión. El muestreo se realizó por conveniencia [63], elaborando especímenes en laboratorio con adiciones de PET en porcentajes de 2%, 3%, 4% y 5% de cantidad de cemento.

Este estudio se lo desarrolló en tres fases: i) caracterización de materiales; ii) Diseño de hormigón patrón y con diferentes porcentajes de adición PET; iii) Ensayos de resistencia del diseño de hormigón con diferentes porcentajes de adición de fibras de tereftalato de polietileno (PET).

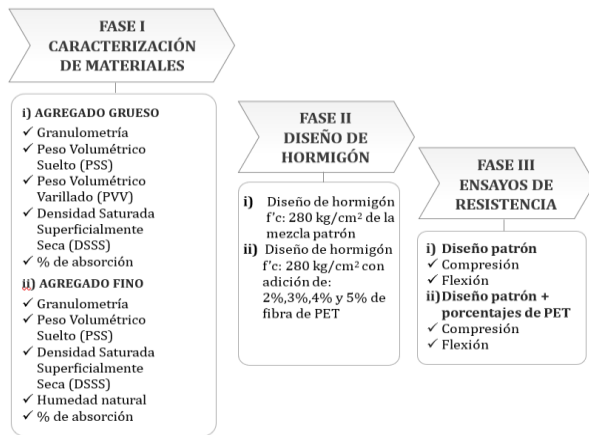


Fig. 2 Fases de la Investigación.

A. Caracterización de materiales en Laboratorio.

Agregados Gruesos. - El contenido y calidad del agregado grueso en una mezcla de concreto es crucial para obtener la resistencia del diseño [64]. Se obtuvieron parámetros físicos necesarios, para el diseño de hormigón en el laboratorio con los siguientes ensayos: i) Granulometría [65]; ii) Peso Volumétrico Suelto (PSS) [66]; iii) Peso Volumétrico Varillado (PVV) [66]; iv) Densidad Saturada Superficialmente Seca (DSSS) [67]; v) Porcentaje de absorción [67] [68]

Agregados Fino. - Se determinaron las propiedades físicas en el laboratorio de la arena mediante los ensayos: i) Granulometría [65]; ii) Peso Volumétrico Suelto (PSS) [66]; iii) Densidad Saturada Superficialmente Seca (DSSS) [69]; iv) Porcentaje de absorción [69] [70]

El primer paso fue determinación en el laboratorio de las propiedades físicas como granulometría y peso específico de los materiales utilizados en la investigación. Los agregados finos y gruesos, el cemento, agua fueron analizados para su adecuación a las especificaciones técnicas.

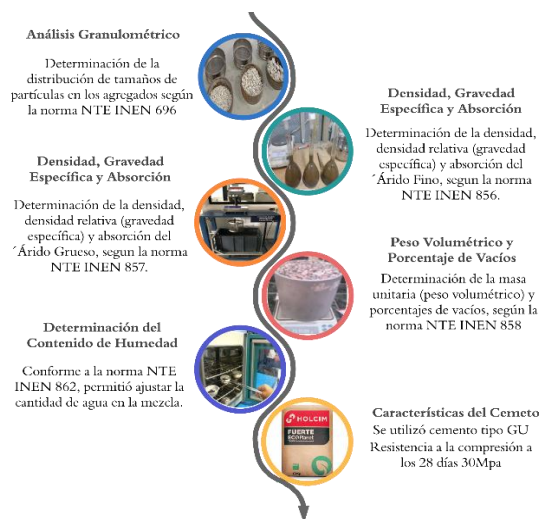


Fig. 3 Caracterización de los Materiales.

B. Diseño de hormigón.

El diseño de las mezclas de hormigón se llevó a cabo siguiendo las directrices del código ACI 211 “**DOSIFICACIÓN DE MEZCLAS DE HORMIGÓN**”. En esta dosificación se realizaron cinco dosificaciones un patrón y cuatro incorporando las fibras de PET en diferentes porcentajes (2%, 3%, 4% y 5%) respecto al peso del cemento.

El PET fue procesado y añadido al hormigón en dos formas distintas: i) fibras lisas; ii) fibras tipo acordeón, con el objetivo de evaluar la influencia de estas variables en el comportamiento mecánico del concreto.

Para el diseño del concreto se necesita establecer: i) la relación agua cemento (0.43); ii) resistencia a la compresión del hormigón (f'c 280 kg/cm²); iii) asentamiento del cono de Abraham (10 cm), iv) caracterización de los agregados; v) tipo de cemento (GU).

C. Ensayos de resistencia.

Con el diseño Patrón y con los propuestos para cada porcentaje de adición de PET se elaboraron probetas en formas de cilindros y vigas, que después del curado, fueron sometidas ensayas para evaluar su desempeño mediante las siguientes pruebas: i) **Resistencia a la compresión:** Los cilindros fueron ensayados según la norma NTE INEN 1573 [71]. La máquina de ensayo aplicó una carga incremental hasta la falla, registrando las fuerzas máximas soportadas; ii) **Resistencia a la flexión:** Las vigas fueron sometidas a ensayos siguiendo las normas ASTM C78 [72] y ASTM C293 [73], para medir su módulo de rotura. Estas pruebas evaluaron la capacidad del hormigón para resistir fuerzas de flexión.

III. RESULTADOS

A. Caracterización de materiales en Laboratorio.

Se realizó la caracterización de los materiales utilizados en la preparación del concreto. Los agregados finos y gruesos, fueron ensayados para verificar su adecuación a las especificaciones técnicas del diseño de hormigón, obteniendo los siguientes resultados.

Agregados gruesos. - los parámetros mecánicos obtenidos en el laboratorio fueron: i) tamaño máximo de 1”, cumple con la faja granulométrica para ese tamaño; ii) PVS 1322.20 kg/m³; iii) PVV 1501.90 kg/m³; iv) DSSS 2617.80 kg/m³; v) Porcentaje de absorción 1.90%.

Agregados Fino. - las propiedades mecánicas obtenidos en el laboratorio fueron: i) se ajustan con las especificaciones granulométricas requeridas en la faja granulométrica, con un Módulo de finura de 2.38%; ii) PVS 1558.55 kg/m³; iii) DSSS 2645.50 kg/m³; iv) Porcentaje de absorción 2.76%.

B. Diseño de hormigón.

De acuerdo con la Dosificación obtenida en peso por m^3 para el diseño de hormigón de 280 kg/cm^2 de resistencia y 10 cm de revenimiento para la muestra patrón fue la siguiente: i) Cemento de 469.74 kg; ii) Agregado Grueso 1066.33 kg; iii) Agregado fino 565.32 kg; iv) agua 201.99 lts; v) Superplastificante 36.76 lts.

Para el análisis experimental se fabricaron seis probetas cilíndricas y cuatro vigas tanto para la muestra patrón como para los diseños con adición de PET, en función del peso del cemento, en los siguientes porcentajes: 2% (0.85 kg), 3% (1.27 kg), 4% (1.69 kg) y 5% (2.12 kg). El PET se incorporó al hormigón en dos formas distintas: **fibras lisas y fibras dobladas tipo acordeón**. La figura 4 representa la dosificación del hormigón $f'c$ 280 kg/cm^2 para el volumen de las probetas a ensayar con relación a los distintos porcentajes de adición PET.

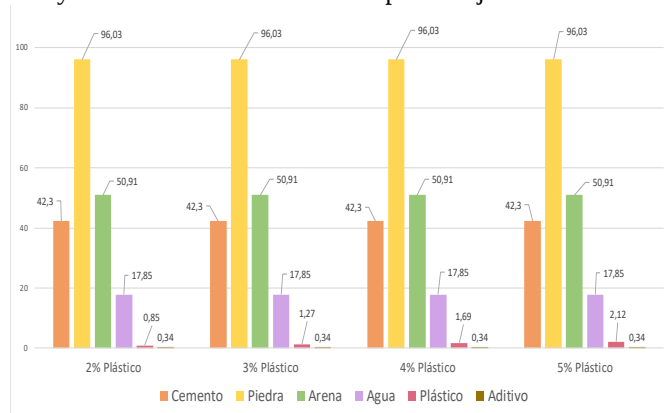


Fig. 4 Proporción de materiales en cada mezcla de hormigón con PET

C. Ensayos de resistencia.

Previo a los ensayos de resistencia se fabricaron las muestras en cilindros para los ensayos de compresión y en vigas para los ensayos de flexión, cumpliendo con la normativa correspondiente de elaboración y curado de probetas de hormigón [74]. Es importante resaltar que las mezclas fueron elaboradas y ensayadas en dos ocasiones, lo que permitió verificar que el rango de variación de la resistencia a la compresión cumpla con lo estipulado en la INEN 1573 [71] y a la resistencia a la flexión en la INEN 2554 [75]. En el ensayo de resistencia a la compresión se ensayaron dos especímenes a los 3, 7 y 28 días y para la resistencia a la flexión se ensayaron dos especímenes a 7 y 28 días.

a) Resistencia a Compresión

Al relacionar la resistencia a la compresión a los 28 días de la mezcla patrón con los ensayos de resistencia de los diseños de hormigón con adición de fibras lisas de PET se obtuvo los siguientes resultados: 2% de PET alcanza un incremento del 3%, 3% de PET aumento la resistencia en un 0.65%, 4%

disminuye el 17% y 5% el 30%. Sin embargo, con la adición de los diferentes porcentajes de fibras dobladas tipo acordeón la resistencia disminuyo desde el 8% hasta el 26%.

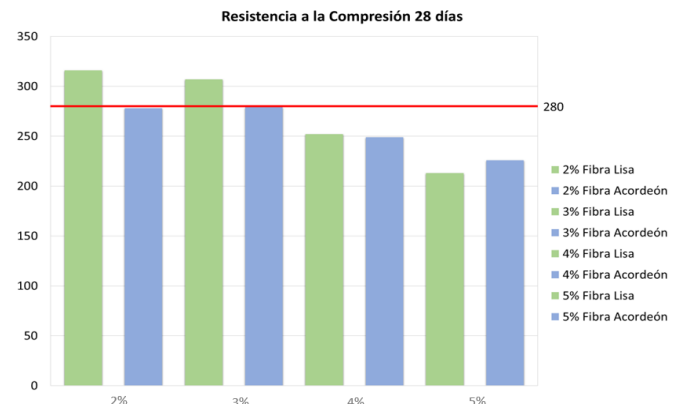


Fig. 5 Resultados del ensayo de resistencia a la compresión a los 28 días.

b) Resistencia a la flexión

Al relacionar la resistencia a flexión a los 28 días de la mezcla patrón y los ensayos de resistencia de los diseños de hormigón con adición de fibras lisas de PET varió la resistencia, con adición del 2% de PET alcanzo un incremento del 12.60%, 3% de PET aumento la resistencia en un 11.50%, 4% el 1.40% y 5% un 0.30%. Sin embargo, con la adición de los diferentes porcentajes de fibras dobladas tipo acordeón la resistencia a la flexión disminuyó hasta un 5%.

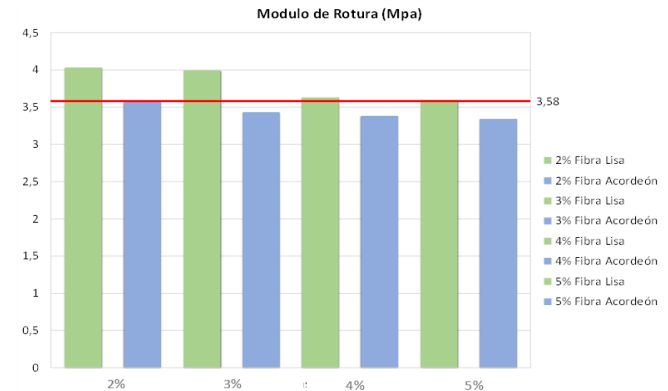


Fig. 6 Resultados del ensayo de resistencia a la flexión a los 28 días.

IV. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en esta investigación evidencian la influencia que tiene la morfología de las fibras PET recicladas en el desempeño mecánico del concreto. Belmokaddem [53], por ejemplo, se centró en la sustitución parcial de los agregados naturales por residuos plásticos (PP, HDPE y PVC) en proporciones de hasta un 75 %. Aunque su propuesta se enfocó en la sustitución volumétrica de agregados y no en el refuerzo adicional, ambos enfoques coinciden en que

un exceso de material plástico tiende a disminuir la resistencia mecánica del concreto. En nuestro caso, el PET fue añadido como refuerzo adicional y no como sustituto, lo que permite evaluar su efecto reforzante sin alterar la base granular del concreto. Esta diferencia metodológica no impide identificar una misma conclusión: el desempeño estructural se ve comprometido cuando se excede en la incorporación del plástico.

Por otro lado, estudios como el desarrollado por Foti [54], reportan incrementos en la ductilidad y resistencia al impacto al emplear tiras de PET en formas laminares y circulares. Particularmente, se destaca que las fibras en forma de “O” demostraron un comportamiento superior y que la dosificación debe mantenerse por debajo del 1% para no afectar negativamente la trabajabilidad del concreto. Estas observaciones concuerdan con los resultados obtenidos en este trabajo, donde las fibras lisas en cantidades moderadas, ofrecieron un mejor desempeño mecánico.

Por su parte, Manaf [55], experimentó con fragmentos de plásticos de 25 mm x 5 mm en proporciones de hasta el 2% y determinó que el mejor rendimiento se logra alrededor del 1%, tanto en compresión como en tracción indirecta. Al superar este límite, se evidenció una disminución en el rendimiento, debido a la mala dispersión de las fibras y a la formación de agrupamientos, lo cual también fue evidente en nuestras muestras, particularmente con las fibras dobladas en adiciones superiores al 2%.

Además, la revisión sistemática realizada por Zulkernain [56], basada en más de 160 estudios, concluye que factores como la forma, tamaño y volumen de las fibras plásticas influyen directamente en su adherencia, trabajabilidad y resistencia del concreto. Se señala que fibras con geometrías irregulares, como el tipo acordeón empleadas en esta investigación, tienden a dificultar una integración uniforme en la matriz cementosa, generando vacíos y reduciendo la compacidad y eficiencia estructural del material.

De igual forma, los resultados reportados por Lee [57], que muestran mejoras importantes en la resistencia a la compresión, flexión, tracción, abrasión y penetración de cloruros en mezclas diseñadas para reparar pavimentos, al incluir 3.84 kg/m³ de fibras PET. Sin embargo, dosificaciones mas altas resultaron menos efectivas por problemas de dispersión, patrón que también se observó en esta investigación. Lo que refuerza la hipótesis de que la combinación adecuada entre morfología y dosificación, optimiza el rendimiento del concreto reforzado con PET.

En conclusión, los estudios citados confirman que tanto la forma como la cantidad de adición del plástico son factores determinantes en las propiedades mecánicas del concreto. Esta investigación concluye que los porcentajes y la forma de la fibra incide en el incremento o disminución de la resistencia concluyendo que el porcentaje óptimo de adición de fibra de PET es el 2% en forma lisa, obteniendo un incremento del 3% en la resistencia a compresión y hasta 12.50% de resistencia a la flexión en comparación con el concreto patrón.

V. AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al proyecto de investigación titulado: “Prototipo de viga para cubiertas reutilizando termoplásticos y residuos de construcción y demolición (RCD) como materia prima”, con código CUP: 91870000.0000.389576.

REFERENCES

- [1] R. Siddique, J. Khatib, and I. Kaur, “Use of recycled plastic in concrete: A review,” *Waste Management*, vol. 28, no. 10, pp. 1835–1852, Jan. 2008, doi: 10.1016/J.WASMAN.2007.09.011.
- [2] N. Evode, S. A. Qamar, M. Bilal, D. Barceló, and H. M. N. Iqbal, “Plastic waste and its management strategies for environmental sustainability,” *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, vol. 4, p. 100142, Dec. 2021, doi: 10.1016/J.CSCEE.2021.100142.
- [3] P. Chalmin, “The history of plastics: from the Capitol to the Tarpeian Rock,” *Field Actions Sci Rep*, no. Special Issue 19, pp. 6–11, Mar. 2019, Accessed: Jun. 16, 2024. [Online]. Available: <http://journals.openedition.org/factsreports/5071>
- [4] F. Galgani and N. Rangel, “White tides: The plastic nurdles problem,” *J Hazard Mater*, vol. 470, p. 134250, May 2024, doi: 10.1016/J.JHAZMAT.2024.134250.
- [5] B. Klun, U. Rozman, M. Ogrizek, and G. Kalčíková, “The first plastic produced, but the latest studied in microplastics research: The assessment of leaching, ecotoxicity and bioadhesion of Bakelite microplastics,” *Environmental Pollution*, vol. 307, p. 119454, Aug. 2022, doi: 10.1016/J.ENVPOL.2022.119454.
- [6] P. Ultra *et al.*, “Reciclado de polietileno tereftalato (pet), diversas opciones,” *Emerging Trends in Education*, ISSN-e 2594-2840, Vol. 17, N°. 32, 2011, vol. 17, no. 32, p. 1, 2011, Accessed: Feb. 06, 2025. [Online]. Available: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9492560&info=resumen&idioma=SPA>
- [7] W. L. Filho *et al.*, “An assessment of attitudes towards plastics and bioplastics in Europe,” *Science of The Total Environment*, vol. 755, p. 142732, Feb. 2021, doi: 10.1016/J.SCIOTENV.2020.142732.
- [8] A. Cabanes, F. J. Valdés, and A. Fullana, “A review on VOCs from recycled plastics,” *Sustainable Materials and Technologies*, vol. 25, p. e00179, Sep. 2020, doi: 10.1016/J.SUSMAT.2020.E00179.
- [9] M. Ragazzi *et al.*, “A Revision for the Different Reuses of Polyethylene Terephthalate (PET) Water Bottles,” *Sustainability* 2022, Vol. 14, Page 4583, vol. 14, no. 8, p. 4583, Apr. 2022, doi: 10.3390/SU14084583.
- [10] L. Cabernard, S. Pfister, C. Oberschelp, and S. Hellweg, “Growing environmental footprint of plastics driven by coal combustion,” *Nature Sustainability* 2021 5:2, vol. 5, no. 2, pp. 139–148, Dec. 2021, doi: 10.1038/s41893-021-00807-2.
- [11] R. Geyer, J. R. Jambeck, and K. L. Law, “Production, use, and fate of all plastics ever made,” *Sci Adv*, vol. 3, no. 7, Jul. 2017, doi: 10.1126/SCIADV.1700782/SUPPL_FILE/1700782_SM.PDF.
- [12] H. Ritchie, V. Samborska, and M. Rose, “Plastic Pollution,” *Our World in Data*, Feb. 2023, doi: 10.1787/DE747AEF-EN.
- [13] I. R. Abubakar *et al.*, “Environmental Sustainability Impacts of Solid Waste Management Practices in the Global South,” *Int J Environ Res Public Health*, vol. 19, no. 19, p. 12717, Oct. 2022, doi: 10.3390/IJERPH191912717.
- [14] J. R. Jambeck *et al.*, “Plastic waste inputs from land into the ocean,” *Science* (1979), vol. 347, no. 6223, pp. 768–771, Feb. 2015, doi: 10.1126/SCIENCE.1260352/SUPPL_FILE/JAMBECK.SM.PDF.
- [15] X. Zhao *et al.*, “Plastic waste upcycling toward a circular economy,” *Chemical Engineering Journal*, vol. 428, p. 131928, Jan. 2022, doi: 10.1016/J.CEJ.2021.131928.
- [16] A. K. Panda, R. K. Singh, and D. K. Mishra, “Thermolysis of waste plastics to liquid fuel: A suitable method for plastic waste management and manufacture of value added products—A world

- prospective,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, no. 1, pp. 233–248, Jan. 2010, doi: 10.1016/J.RSER.2009.07.005.
- [17] F. Khan, W. Ahmed, A. Najmi, and M. Younus, “Managing plastic waste disposal by assessing consumers’ recycling behavior: the case of a densely populated developing country,” *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 26, no. 32, pp. 33054–33066, Nov. 2019, doi: 10.1007/s11356-019-06411-4.
- [18] N. A. Welden, “The environmental impacts of plastic pollution,” *Plastic Waste and Recycling: Environmental Impact, Societal Issues, Prevention, and Solutions*, pp. 195–222, Jan. 2020, doi: 10.1016/B978-0-12-817880-5.00008-6.
- [19] H. I. Abdel and M. S. M. Mansour, “Solid waste issue: Sources, composition, disposal, recycling, and valorization,” *Egyptian Journal of Petroleum*, vol. 27, no. 4, pp. 1275–1290, Dec. 2018, doi: 10.1016/J.EJPE.2018.07.003.
- [20] K. Umar Donuma, L. Ma, C. Bu, L.-Y. George, M. Gashau, and A. O. Suleiman, “Environmental and human health risks of indiscriminate disposal of plastic waste and sachet water bags in Maiduguri, Borno State Nigeria,” *Waste Management Bulletin*, vol. 2, no. 2, pp. 130–139, Jun. 2024, doi: 10.1016/J.WMB.2024.04.002.
- [21] M. G. Kibria, N. I. Masuk, R. Safayet, H. Q. Nguyen, and M. Mourshed, “Plastic Waste: Challenges and Opportunities to Mitigate Pollution and Effective Management,” *Int J Environ Res*, vol. 17, no. 1, p. 20, Feb. 2023, doi: 10.1007/S41742-023-00507-Z.
- [22] A. Pandey, “The plastic water bottles - Impact on environment,” *Journal of Emerging Technologies and Innovative Research (JETIR)*, vol. 10, no. 6, 2023, Accessed: Jun. 17, 2024. [Online]. Available: www.jetir.org/a525
- [23] T. R. Walker and L. Fequet, “Current trends of unsustainable plastic production and micro(nano)plastic pollution,” *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, vol. 160, p. 116984, Mar. 2023, doi: 10.1016/J.TRAC.2023.116984.
- [24] M. Aryal and S. Adhikary, “Solid waste management practices and challenges in Besisahar municipality, Nepal,” *PLoS One*, vol. 19, no. 3, Mar. 2024, doi: 10.1371/JOURNAL.PONE.0292758.
- [25] F. Ilyas, “Experts point out flaws in govt strategy to curb plastic pollution,” *Dawn*, pp. 1–4, Apr. 03, 2018.
- [26] F. Khan, W. Ahmed, and A. Najmi, “Understanding consumers’ behavior intentions towards dealing with the plastic waste: Perspective of a developing country,” *Resour Conserv Recycl*, vol. 142, pp. 49–58, Mar. 2019, doi: 10.1016/J.RESCONREC.2018.11.020.
- [27] A. Chamas *et al.*, “Degradation Rates of Plastics in the Environment,” *ACS Sustain Chem Eng*, vol. 8, no. 9, pp. 3494–3511, Mar. 2020, doi: 10.1021/ACSSUSCHEMENG.9B06635/ASSET/IMAGES/LARGE/SC9B06635_0009.JPEG.
- [28] C. Orset, N. Barret, and A. Lemaire, “How consumers of plastic water bottles are responding to environmental policies?,” *Waste Management*, vol. 61, pp. 13–27, Mar. 2017, doi: 10.1016/J.WASMAN.2016.12.034.
- [29] T. Muringayil Joseph *et al.*, “Polyethylene terephthalate (PET) recycling: A review,” *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, vol. 9, p. 100673, Jun. 2024, doi: 10.1016/J.CSCEE.2024.100673.
- [30] P. Baldowska-Witos, W. Kruszelnicka, and A. Tomporowski, “Life cycle assessment of beverage bottles,” *J Phys Conf Ser*, vol. 1426, no. 1, p. 012038, Jan. 2020, doi: 10.1088/1742-6596/1426/1/012038.
- [31] J. Alexander Saucedo Rodriguez *et al.*, “Uso de los agregados PET en la elaboración del concreto: Revisión de la literatura,” *Avances Investigación en Ingeniería*, vol. 18, no. 2 (Julio-Diciembre), Aug. 2021, doi: 10.18041/1794-4953/AVANCES.2.6942.
- [32] P. Lamba *et al.*, “Repurposing plastic waste: Experimental study and predictive analysis using machine learning in bricks,” *J Mol Struct*, vol. 1317, p. 139158, Dec. 2024, doi: 10.1016/J.MOLSTRUC.2024.139158.
- [33] M. Mohammed *et al.*, “Modeling of 3R (Reduce, Reuse and Recycle) for Sustainable Construction Waste Reduction: A Partial Least Squares Structural Equation Modeling (PLS-SEM),” *Sustainability* 2021, Vol. 13, Page 10660, vol. 13, no. 19, p. 10660, Sep. 2021, doi: 10.3390/SU131910660.
- [34] M. A. Zensich, Á. Caballero, and A. Y. Tesio, “Multi-source recovered graphite and its use in electrodes for energy storage,” *Curr Opin Electrochem*, vol. 37, p. 101186, Feb. 2023, doi: 10.1016/J.COELEC.2022.101186.
- [35] N. Akkouri, O. Bourzik, K. Baba, and A. Nounah, “Experimental study of the thermal and mechanical properties of concrete incorporating recycled polyethylene,” *Mater Today Proc*, vol. 58, pp. 1525–1529, Jan. 2022, doi: 10.1016/J.MATPR.2022.03.293.
- [36] P. Benyathiar, P. Kumar, G. Carpenter, J. Brace, and D. K. Mishra, “Polyethylene Terephthalate (PET) Bottle-to-Bottle Recycling for the Beverage Industry: A Review,” *Polymers* 2022, Vol. 14, Page 2366, vol. 14, no. 12, p. 2366, Jun. 2022, doi: 10.3390/POLYM14122366.
- [37] P. A. Claisse, “Introduction to cement and concrete,” *Civil Engineering Materials*, pp. 155–162, Jan. 2016, doi: 10.1016/B978-0-08-100275-9.00017-6.
- [38] R. J. Flatt, N. Roussel, and C. R. Cheeseman, “Concrete: An eco material that needs to be improved,” *J Eur Ceram Soc*, vol. 32, no. 11, pp. 2787–2798, Aug. 2012, doi: 10.1016/J.JEURCERAMSOC.2011.11.012.
- [39] G. Habert, C. Billard, P. Rossi, C. Chen, and N. Roussel, “Cement production technology improvement compared to factor 4 objectives,” *Cem Concr Res*, vol. 40, no. 5, pp. 820–826, May 2010, doi: 10.1016/J.CEMCONRES.2009.09.031.
- [40] H. Sulaiman, L. O. Martínez, and C. Filippin, “¿Utopía o realidad? Factibilidad de un proyecto de vivienda multifamiliar con materiales reciclados en el centro de Argentina,” *Revista 180*, no. 51, pp. 41–55, 2023, doi: 10.32995/REV180.NUM-51.(2022).ART-1006.
- [41] D. Foti, “Recycled waste PET for sustainable fiber-reinforced concrete,” *Use of Recycled Plastics in Eco-efficient Concrete*, pp. 387–410, Jan. 2018, doi: 10.1016/B978-0-08-102676-2.00018-9.
- [42] K. Křížová, Š. Baránek, J. Bubeník, and T. Mazán, “Study of the behaviour of recycled and traditional fibres in cement composite at extreme temperatures,” *Journal of Building Engineering*, vol. 95, p. 110134, Oct. 2024, doi: 10.1016/J.JOBE.2024.110134.
- [43] A. E. S. Musa, A. Ahmed, S. Ahmad, K. Mohamed, A. Al-Fakih, and M. A. Al-Osta, “Properties of concrete incorporating plastic wastes and its applications: A comprehensive review,” *Journal of Building Engineering*, vol. 101, p. 111843, May 2025, doi: 10.1016/J.JOBE.2025.111843.
- [44] L. Mansilla-Pérez and M. Ruiz-Ruiz, “Reciclaje de botellas de PET para obtener fibra de poliéster,” *Ingeniería Industrial*, vol. 0, no. 027, pp. 123–137, Jun. 2009, doi: 10.26439/ING.IND2009.N027.627.
- [45] C. Daniel, R. O. Onchiri, and B. O. Omondi, “Structural behaviour of reinforced concrete beams containing recycled polyethylene terephthalate and sugarcane bagasse ash,” *Applications in Engineering Science*, vol. 18, p. 100178, Jun. 2024, doi: 10.1016/J.APPLS.2024.100178.
- [46] R. ; Ramadan *et al.*, “Improving Structural Performance of Reinforced Concrete Beams with Phragmites Australis Fiber and Waste Glass Additives,” *Applied Sciences* 2023, Vol. 13, Page 4206, vol. 13, no. 7, p. 4206, Mar. 2023, doi: 10.3390/APP13074206.
- [47] J. M. Mendoza-Rangel, J. H. Díaz-Aguilera, J. M. Mendoza-Rangel, and J. H. Díaz-Aguilera, “Economía circular en la industria latinoamericana del cemento y el concreto: una solución sustentable de diseño, durabilidad, materiales y procesos,” *Revista ALCONPAT*, vol. 13, no. 3, pp. 328–348, Sep. 2023, doi: 10.21041/RA.V13I3.697.
- [48] A. Rejeb, Z. Suhaiza, K. Rejeb, S. Seuring, and H. Treiblmaier, “The Internet of Things and the circular economy: A systematic literature review and research agenda,” *J Clean Prod*, vol. 350, p. 131439, May 2022, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2022.131439.
- [49] M. Lieder and A. Rashid, “Towards circular economy implementation: a comprehensive review in context of

- manufacturing industry,” *J Clean Prod*, vol. 115, pp. 36–51, Mar. 2016, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2015.12.042.
- [50] M. Lieder and A. Rashid, “Towards circular economy implementation: a comprehensive review in context of manufacturing industry,” *J Clean Prod*, vol. 115, pp. 36–51, Mar. 2016, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2015.12.042.
- [51] J. Kirchherr, N. H. N. Yang, F. Schulze-Spüntrup, M. J. Heerink, and K. Hartley, “Conceptualizing the Circular Economy (Revisited): An Analysis of 221 Definitions,” *Resour Conserv Recycl*, vol. 194, p. 107001, Jul. 2023, doi: 10.1016/J.RESCONREC.2023.107001.
- [52] K. Winans, A. Kendall, and H. Deng, “The history and current applications of the circular economy concept,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 68, pp. 825–833, Feb. 2017, doi: 10.1016/J.RSER.2016.09.123.
- [53] M. Belmokaddem, A. Mahi, Y. Senhadji, and B. Y. Pekmezci, “Mechanical and physical properties and morphology of concrete containing plastic waste as aggregate,” *Constr Build Mater*, vol. 257, p. 119559, Oct. 2020, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2020.119559.
- [54] D. Foti, “Recycled waste PET for sustainable fiber-reinforced concrete,” *Use of Recycled Plastics in Eco-efficient Concrete*, pp. 387–410, Jan. 2019, doi: 10.1016/B978-0-08-102676-2.00018-9.
- [55] A. F. Abdul Manaf *et al.*, “Properties of Concrete Containing Recycled Polyethylene Terephthalate (PET) Fibre,” *Lecture Notes in Civil Engineering*, vol. 157 LNCE, pp. 237–246, 2021, doi: 10.1007/978-981-16-2187-1_21.
- [56] N. H. Zulkernain, P. Gani, N. Chuck Chuan, and T. Uvarajan, “Utilisation of plastic waste as aggregate in construction materials: A review,” *Constr Build Mater*, vol. 296, p. 123669, Aug. 2021, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2021.123669.
- [57] S. J. Lee, H. Shin, H. N. Lee, S. H. Park, H. M. Kim, and C. G. Park, “Effect of Waste PET Fiber on the Mechanical Properties and Chloride Ion Penetration of Emergency Repair Concrete for Road Pavement,” *Materials* 2024, Vol. 17, Page 5352, vol. 17, no. 21, p. 5352, Oct. 2024, doi: 10.3390/MA17215352.
- [58] Organización de las Naciones Unidas, “La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: una oportunidad para América Latina y el Caribe,” 2015, Accessed: Feb. 12, 2025. [Online]. Available: www.issuu.com/publicacionescepal/stacks
- [59] H. Sanchez Carlessi and C. Reyes Meza, *Metodología y diseños en la investigación científica*. Lima: Biblioteca Nacional del Peru, 2015.
- [60] N. E. Nieto, “Tipos de Investigación,” *Universidad Santo Domingo de Guzmán*, vol. 1, no. 1, pp. 1–4, 2018.
- [61] A. Rodríguez Jiménez and A. O. Pérez Jacinto, “Métodos científicos de indagación y de construcción del conocimiento,” *Revista Escuela de Administración de Negocios*, no. 82, pp. 175–195, Jul. 2017, doi: 10.21158/01208160.n82.2017.1647.
- [62] A. Rodríguez Castellanos, A. Miranda Vázquez, A. Almaguer Delgado, and E. Bombino Matos, “La investigación científica educativa en estudiantes de la salud. Problemas y desafíos,” *MEDISAN*, vol. 17, pp. 9299–9306, 2013.
- [63] M. Medina, R. Rojas, W. Bustamante, R. Loaiza, C. Martel, and R. Castillo, *Metodología de la investigación: Técnicas e instrumentos de investigación*. Instituto Universitario de Innovación Ciencia y Tecnología Inudi Perú, 2023. doi: 10.35622/inudi.b.080.
- [64] N. R. Mohanta and M. Murmu, “Alternative coarse aggregate for sustainable and eco-friendly concrete - A review,” *Journal of Building Engineering*, vol. 59, p. 105079, Nov. 2022, doi: 10.1016/J.JOBE.2022.105079.
- [65] NTE INEN 696, “Áridos. Análisis Granulométrico en los Áridos, Fino y Grueso,” Quito, 2011.
- [66] NTE INEN 858, “Áridos. Determinación de la Masa Unitaria (Peso Volumétrico) y el Porcentaje de Vacíos,” 2010.
- [67] NTE INEN 857, “Áridos. Determinación de la Densidad, Densidad Relativa (Gravedad Específica) y Absorción del Árido Grueso,” 2010.
- [68] K. Hosen, M. A. Al Maruf, R. Howlader, K. Chakma, and M. R. Mia, “Concrete Strength and Aggregate Properties: In-Depth Analysis of Four Sources,” *Civil Engineering Journal*, vol. 10, no. 4, pp. 1254–1264, Apr. 2024, doi: 10.28991/CEJ-2024-010-04-016.
- [69] NTE INEN 856, “Áridos. Determinación de la Densidad, Densidad Relativa (Gravedad Específica) y Absorción del Árido Fino,” 2010.
- [70] M. Sahraoui and T. Bouziani, “Effects of fine aggregates types and contents on rheological and fresh properties of SCC,” *Journal of Building Engineering*, vol. 26, p. 100890, Nov. 2019, doi: 10.1016/J.JOBE.2019.100890.
- [71] NTE INEN 1573, “Hormigón de Cemento Hidráulico. Determinación de la Resistencia a la Compresión de Especímenes Cilíndricos de Hormigón de Cemento Hidráulico,” 2010.
- [72] ASTM C78, “Método de Ensayo Estándar para Resistencia a la Flexión del Concreto (Usando Viga Simple con Carga a los Tercios del Claro),” 2009.
- [73] ASTM C293, “Método de Ensayo Estándar para Resistencia a la Flexión del Concreto (Usando una Viga Simple con Carga al Centro del Claro),” 2016.
- [74] NTE INEN 1576, “Hormigón de Cemento Hidráulico. Elaboración y Curado en Obra de Especímenes para Ensayo,” 2011.
- [75] NTE INEN 2554, “Hormigón de Cemento Hidráulico. Determinación de la Resistencia a la Flexión del Hormigón. (Utilizando una Viga Simple con Carga en los Tercios),” 2011.