

ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL USO DE RESIDUOS DE BOTELLAS DE PLÁSTICO EN EL HORMIGÓN CONVENCIONAL

Experimental study on the use of plastic bottle waste in conventional concrete

Samuel HUAQUISTO-CÁCERES^{1*} y Darwin QUENTA-FLORES²

¹Universidad Nacional del Altiplano Puno, Avenida Floral 1153, Puno 21001, Perú.

²Universidad Nacional de Moquegua, Calle Áncash sin número Cercado, Moquegua 18001, Perú.

*Autor para correspondencia: shuaquisto@unap.edu.pe

(Recibido: noviembre 2022; aceptado: marzo 2023)

Palabras clave: compresión, fibras PET, flexión, hormigón, reciclaje.

RESUMEN

La gestión inadecuada de los residuos de botellas de plástico está teniendo un impacto negativo en el ambiente. El reciclaje de estos residuos para su inclusión en la matriz del hormigón es una alternativa viable para su disposición final. El objetivo de este estudio fue evaluar el comportamiento mecánico del hormigón convencional con la adición de fibras de politereftalato de etileno (PET), diseñado según los procedimientos establecidos por el Instituto Americano del Concreto para una resistencia de 20 MPa. Las propiedades analizadas del hormigón incluyeron la consistencia, densidad, resistencia a compresión y flexión. Se elaboraron 60 especímenes cilíndricos y 60 prismáticos con adiciones de fibras PET del 0 %, 2 %, 4 %, 6 % y 8 % respecto al peso del cemento para ensayarlos a roturas a los 7, 14 y 28 días de curado. Los resultados indican que se alcanzan resistencias a compresión y flexión máximas de 22.79 MPa y 3.19 MPa, a los 28 días con la adición del 2 % y el 6 % de fibras PET, respectivamente. Por lo tanto, se recomienda su aplicación hasta una proporción del 4 %, donde la dosificación correspondiente es de 15.78 kilogramos de fibras PET por metro cúbico de hormigón con una consistencia trabajable.

Key words: compression, PET fibers, bending, concrete, recycling.

ABSTRACT

Improper management of plastic bottle waste is harming the environment. Recycling this waste for inclusion in the concrete matrix is a viable alternative for its final disposal. The objective of this study was to evaluate the mechanical behavior of conventional concrete with the addition of polyethylene terephthalate (PET) fibers, designed according to the procedures established by the American Concrete Institute for a strength of 20 MPa. The analyzed properties of the concrete included consistency, density, compressive strength, and flexural strength. Sixty cylindrical and 60 prismatic specimens with PET fiber additions of 0%, 2%, 4%, 6%, and 8% by weight of cement were prepared for testing at 7, 14, and 28 days of curing. The results indicate that maximum compressive and flexural strengths of 22.79 MPa and 3.19 MPa are achieved at 28 days by adding 2% and 6% PET fibers. Therefore, its application is recommended up to a proportion of 4%, where the corresponding dosage is 15.78 kilograms of PET fibers per cubic meter of concrete with a workable consistency.

INTRODUCCIÓN

La mala gestión de los residuos plásticos provoca que aproximadamente 8 millones de toneladas anuales de plástico sean arrojadas a los océanos, lo que causa daños a la flora, fauna y seres humanos (Neri et al. 2021). Sin embargo, es posible convertir estos residuos plásticos en otros materiales, lo que se traduce en una reducción directa de la producción y en beneficios ambientales y sociales. La fibra plástica es una oportunidad para transformarla e incluirla en materiales constructivos como el hormigón, que muestra un potencial enorme debido a su capacidad para incorporar materiales reciclados en su estructura (Fioriti et al. 2020). Estos beneficios influirán en la reducción del consumo de áridos naturales y en la mejora de sus propiedades (Mercante et al. 2018). En ese sentido, es importante que se consideren criterios de sostenibilidad, durabilidad, gestión inteligente del ciclo de vida, seguridad, rendimiento y resiliencia (Hao et al. 2023) de los materiales en todo proceso constructivo de infraestructura civil.

En la industria de la construcción, el hormigón es el material más utilizado en todo el mundo y se destaca por ser la sustancia más abundante en el planeta (Shubbar y Al-Shadeedi 2017). A pesar de su alta resistencia a la compresión en estado endurecido, este material presenta limitada resistencia a la tracción, baja resistencia a la flexión, baja resistencia a la deformación y expansión de grietas que aparecen antes de aplicar la carga, debido a cambios volumétricos que resultan de la contracción o variaciones de temperatura (Khatab et al. 2019). Ante estos problemas, se ha propuesto como alternativa el uso de fibras PET recicladas con diferentes geometrías y relieves, lo que permite un mejor control del agrietamiento por contracción plástica (Kim et al. 2008). Además, se ha demostrado que las fibras PET aumentan la ductilidad después de la rotura debido al “efecto de costura” que presentan contra numerosas micro fisuras que tienden a formarse naturalmente en el hormigón en las primeras etapas de su vida (Foti 2019).

La inclusión de residuos de fibras de botellas de plástico en el hormigón ha sido ampliamente estudiada en proyectos de construcción. La aplicación de estas fibras plásticas no sólo mitiga la contaminación ambiental, sino que también mejora el desempeño del hormigón a una densidad menor en comparación con el hormigón convencional (Cui et al. 2019, Hameed y Fatah 2019). Además, debido a su mayor densidad y tensión de humectación, las fibras PET se pueden mezclar con facilidad en el hormigón en comparación con las fibras de polipropileno (Yin et

al. 2015). Sin embargo, la resistencia de las fibras PET a los álcalis es motivo de preocupación en el proceso de elaboración. A pesar de esto, diversos estudios demuestran que no hay problemas al usar la fibra en hormigón normal (Ochi et al. 2007) y que el grado de degradación de estas fibras en ambientes alcalinos depende de la concentración alcalina, la temperatura y la duración del tratamiento alcalino (Rostami et al. 2020).

En la actualidad se están utilizando materiales derivados de residuos, como las fibras de PET, en la construcción de carreteras (Aghayan y Khafajeh 2019). Tal es el caso del pavimento rígido, que es más durable que el pavimento asfáltico, requiere menos mantenimiento, tiene una vida útil más larga (Hassouna y Jung 2020) y su diseño requiere la consideración de parámetros como el espesor y el módulo de ruptura (Abdulridha et al. 2020). Al respecto, las solicitaciones por resistencia a flexión pueden requerir grandes espesores de pavimento, lo que puede llevar a un consumo excesivo de recursos. Sin embargo, este problema puede reducirse mediante la inclusión de materiales complementarios en el diseño, como barras de acero, fibras, etc. (Ali et al. 2020). En consecuencia, las fibras PET son una alternativa económica para mejorar la resistencia a flexión del hormigón, que es la variable más determinante en el diseño del pavimento rígido, proporcionándole mayor ductilidad y durabilidad.

Por lo general, los investigadores han utilizado tres tipos de residuos plásticos: politereftalato de etileno (PET), polietileno (PE) y polipropileno (PP) como modificadores en el pavimento rígido (Zhao et al. 2020). Estos insumos permiten reducir la frecuencia en el mantenimiento rutinario y periódico de las losas rígidas (Torres et al. 2018). Por tanto, el desarrollo de una nueva dosificación del hormigón se convierte en un tema importante en el diseño para mejorar el rendimiento y reducir el espesor requerido del pavimento, lo que a su vez ayuda a reducir los altos costos asociados a su construcción (Hassouna y Jung 2020). Además, es importante tener en cuenta que los hormigones reforzados con fibras plásticas pueden proporcionar pavimentos menos costosos que el hormigón reforzado con fibra de acero (Hussain et al. 2020).

El uso de fibras PET en pavimentos ha llevado a los investigadores a centrarse en varios aspectos clave de esta tecnología para mejorar la resistencia y durabilidad del hormigón reforzado con fibra plástica y hacerlo más sostenible (Chan et al. 2019, AlShareedah y Nassiri 2021). Este tipo de hormigón es potencialmente factible para pavimentos rígidos, ya

que puede hacerlos más resistentes y económicos. Sin embargo, cuando se elabora con agregados naturales de río, que tienen partículas redondeadas, el hormigón puede presentar fallas causadas por la ruptura en la pasta de cemento, lo que afecta la flexibilidad del material, que es uno de los principales factores a considerar en el diseño de pavimentos rígidos. Por lo tanto, el reforzamiento con fibras plásticas es una solución viable para abordar estas deficiencias.

Finalmente, el objetivo de este estudio fue evaluar el comportamiento mecánico del hormigón convencional al agregarle fibras PET recicladas en términos de trabajabilidad, densidad, resistencia a la compresión y a la flexión. La inclusión de fibras PET discretas dentro de la mezcla de hormigón tiene como propósito contener las micro fisuras de contracción y retrasar la propagación de estas grietas dentro del hormigón, mejorando así su resistencia, durabilidad y vida útil bajo fatiga para diferentes aplicaciones en obras de ingeniería civil.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para llevar a cabo el estudio experimental se elaboraron 60 probetas cilíndricas con un diámetro de 150 mm y una altura de 300 mm para determinar la resistencia a la compresión del hormigón, y 60 probetas prismáticas con una sección transversal de 150 mm x 150 mm y una longitud de 500 mm para determinar la resistencia a la flexión. Cada caso se ensayó en una prensa ADR de 2000 kN para medir las roturas a los 7, 14 y 28 días con cuatro repeticiones. Las muestras de hormigón fresco permanecieron en el molde durante 24 horas antes de ser curadas en agua a una temperatura constante de 9.4 °C en el laboratorio hasta el momento del ensayo. El porcentaje de fibras PET utilizado en la mezcla de hormigón fue del 2 %, 4 %, 6 % y 8 % en relación al peso del cemento, lo que equivale a 7.9 kg/m³, 15.8 kg/m³, 23.7 kg/m³ y 31.6 kg/m³ del hormigón patrón diseñado para alcanzar una resistencia mínima de 20 MPa a los 28 días sin la adición de fibras PET (considerado al 0 %).

En el presente estudio se utilizó cemento Portland IP normado por la ASTM C595 (ASTM 2020) con un peso específico de 2820 kg/m³ para el diseño del hormigón. El agua empleada en la mezcla fue potable y los agregados naturales se obtuvieron de la cantera de Cutimbo, ubicada a una altitud superior a los 3820 msnm y a 24 km de la ciudad de Puno, en Perú. Las características de los agregados se presentan en el

CUADRO I. CARACTERIZACIÓN DE LOS AGREGADOS FINO Y GRUESO PROVENIENTES DE LA CANTERA CUTIMBO PARA SU USO EN LA PRODUCCIÓN DE HORMIGÓN.

Descripción	Unidad	Agregado fino	Agregado grueso
Tamaño máximo	mm	Nº 4	25.4
Peso específico	kg/m ³	2430	2480
Peso unitario suelto seco	kg/m ³	1511	1466
Peso unitario compacto seco	kg/m ³	1708	1619
Contenido de humedad	%	3.94	2.89
Absorción	%	4.59	2.94
Módulo de fineza		3.15	6.84

Nota: La cantera Cutimbo se caracteriza por su producción de agregados naturales que son seleccionados adecuadamente para su uso en la industria del hormigón.

cuadro I, mientras que la distribución granulométrica del agregado fino y grueso se ilustra en las **figuras 1 y 2**, respectivamente. Ambas distribuciones cumplen con las especificaciones de gradación de la ASTM C33 (ASTM 2018).

Respecto a las fibras PET, estas tienen la propiedad de ser durables en condiciones ambientales adversas, como la congelación, la corrosión y la lixiviación química (Mohseni et al. 2019) y tienen un coeficiente de fricción bajo y un módulo de flexión alto. Químicamente, se expresan como (C₁₀H₈O₄)_n y se producen a partir del petróleo, resultado de las reacciones entre el etilenglicol y el ácido tereftalato. Las propiedades mecánicas y físicas de las fibras PET se muestran en el **cuadro II**. En la **figura 3** se muestra el proceso de elaboración de las fibras PET a partir de botellas plásticas, las cuales se recolectan y se cortan en tiras de 2 a 3 mm de ancho por 30 mm de largo mediante una guillotina manual, a diferencia de otros estudios que procesan el PET en forma de hojuelas con bordes angulosos, debido a que provienen de recipientes triturados mecánicamente (Ojeda y Mercante 2021).

Con base en las propiedades características de los agregados finos y gruesos, se diseñó la mezcla de hormigón convencional para obtener una resistencia a la compresión de 20 MPa, siguiendo el método 211 del Instituto Americano del Concreto (1991) (ACI, por su sigla en inglés). Los resultados del diseño, expresados en kg/m³ y proporciones por peso, son los siguientes: cemento 394.63 kg (1), agregado fino 607.64 kg (1.54), agregado grueso 1057.78 kg (2.68) y agua 197.31 kg (0.5). A estos resultados del diseño se les han añadido las fibras PET en las proporciones previamente especificadas, manteniendo el hormigón

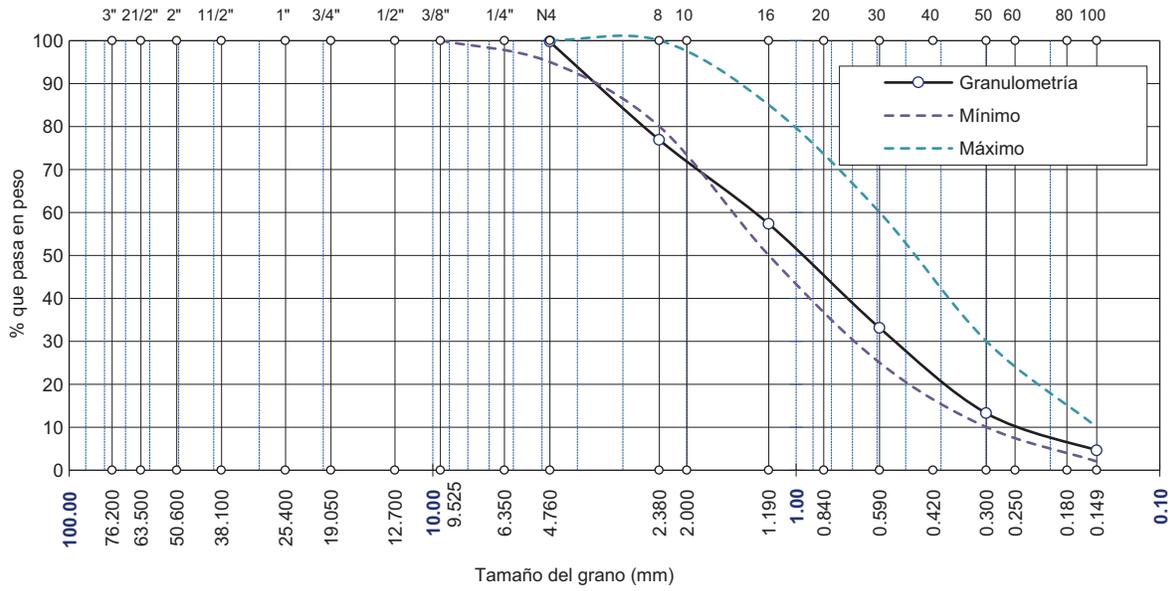


Fig. 1. Distribución granulométrica y especificación para el agregado fino.

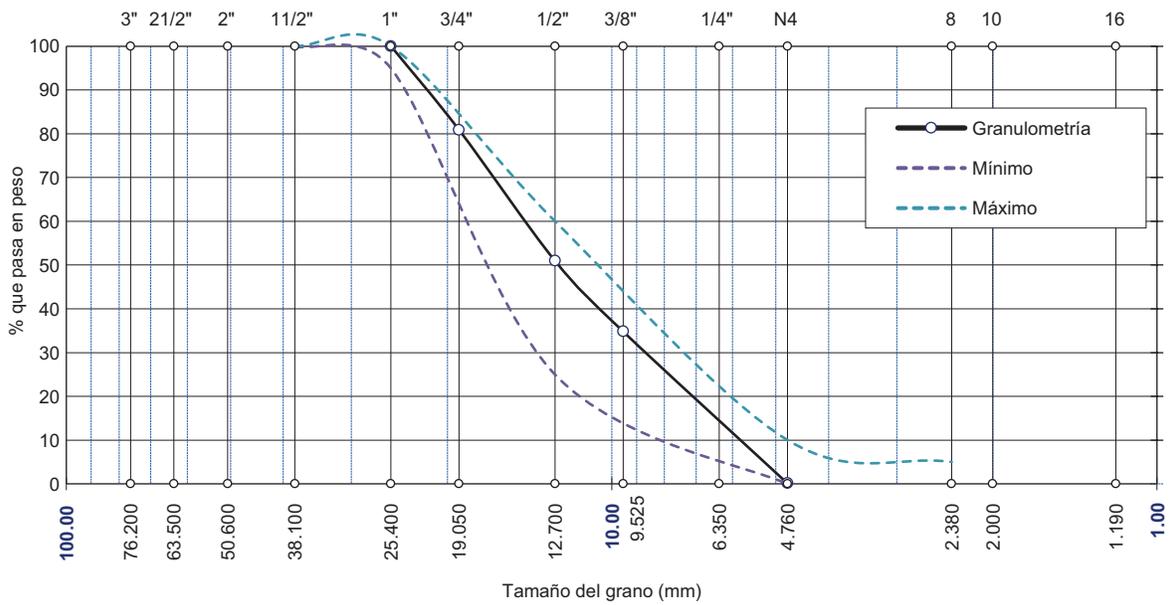


Fig. 2. Distribución granulométrica y especificación para el agregado grueso.

fresco dentro del rango plástico con asentamientos de 76.2 mm a 101.6 mm para una relación agua-cemento de 0.50. La figura 4 muestra los ensayos realizados durante el proceso.

Los datos recolectados para las variables del estudio cumplen los supuestos de normalidad en la prueba de Shapiro-Wilk ($p > 0.05$) y de homocedasticidad para la prueba de Levene ($p > 0.05$).

Por tanto, se ha utilizado la prueba paramétrica del análisis de varianza para realizar las comparaciones de los grupos complementándose con la prueba de Tukey para obtener las similitudes o diferencias al 95 % de confiabilidad. Además, se ha calculado el coeficiente de correlación de Pearson (r) para determinar la relación entre la densidad y la resistencia a compresión simple del concreto.

CUADRO II. PROPIEDADES MECÁNICAS Y FÍSICAS DE LAS FIBRAS DE POLITEREFTALATO DE ETILENO.

Propiedades	Unidad	Valores
Densidad	kg/m ³	1380
Relación de aspecto (promedio)		20
Espesor	mm	0.05
Resistencia a la tracción, (σ_t)	MPa	64
Módulo de elasticidad, (E)	MPa	2950
Resistencia a ácidos y alcalinos		Elevado
Ancho	mm	2-3 (*)
Longitud (media)	mm	30 (*)

Nota: A partir de estudios de Bozyigit et al. (2021). (*) Elaboración propia.

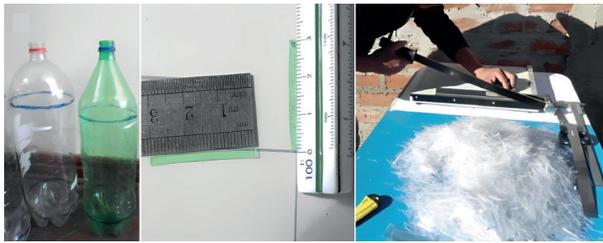


Fig. 3. Proceso de elaboración de las fibras de politereftalato de etileno recicladas.



Fig. 4. Probeta cilíndrica con fibras de politereftalato de etileno después del ensayo a la compresión. Espécimen prismático y medición del asentamiento.

RESULTADOS

Asentamiento

La trabajabilidad del hormigón fresco es esencial para su correcta manipulación y colocación en obra (Subramani y Rahman 2017), y puede ser evaluada mediante el cono de Abrams, que mide el asentamiento o consistencia de la mezcla fresca de acuerdo con las especificaciones de la norma ASTM C143 (ASTM 2012). No obstante, es importante tener en cuenta que la adición de residuos plásticos como el PET puede afectar la cantidad de agua libre disponible

en la mezcla y, por tanto, su trabajabilidad (Sharma y Bansal 2016).

Los resultados del asentamiento promedio se muestran en la **figura 5**. La mezcla de hormigón fresco con proporciones del 0 %, 2 % y 4 % de fibras PET reporta asentamientos de 93, 86 y 80 mm respectivamente, con desviaciones estándar de 2.6, 1.6 y 1.8. Estos valores se mantienen dentro del rango plástico (asentamiento de 76.2 mm a 101.6 mm). Sin embargo, para proporciones mayores de PET, el hormigón fresco tiene una consistencia fluida (asentamientos menores a 76.2 mm) debido al incremento de las fibras PET en la mezcla, lo que disminuye su consistencia. Del análisis de varianza realizado se determinó que, en al menos una proporción, el promedio del asentamiento es diferente a los demás [$F(p=0)$]. Además, la prueba de Tukey demostró que los asentamientos para las proporciones de 2 % y 4 % son equivalentes. En consecuencia, el hormigón es trabajable para proporciones de PET hasta el 4 % en que mantiene su consistencia plástica.

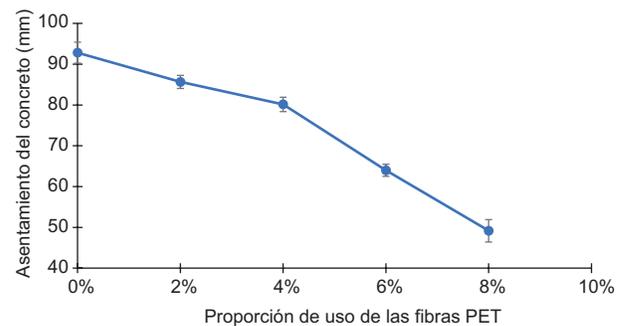


Fig. 5. Resultados del ensayo de asentamiento para diferentes proporciones de fibras de politereftalato de etileno (PET).

Densidad

La densidad del hormigón endurecido se evalúa como la relación de su masa entre el volumen que ocupa y es un indicador que se relaciona directamente con su resistencia. Los hormigones convencionales de peso normal suelen tener densidades dentro del rango promedio aproximado de 2200 a 2400 kg/m³, el cual puede verse afectado con la incorporación de las fibras PET.

La **figura 6** presenta los resultados de las densidades del hormigón. Se observa que la densidad de las muestras de hormigón disminuye desde un valor medio de 2254.45 kg/m³ al 0 % hasta 2213.30 kg/m³ para el 8 % de fibras PET, con desviaciones estándar de 2.7 y 2.3 kg/m³, respectivamente. Los resultados del análisis de varianza y la prueba de Tukey

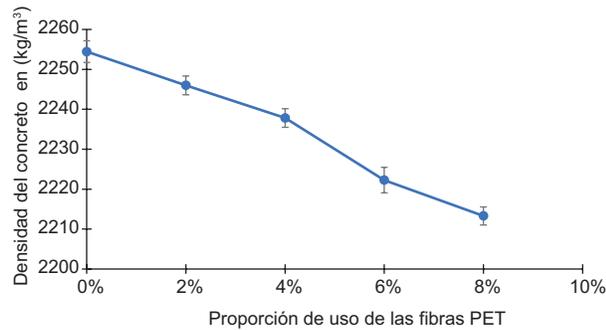


Fig. 6. Resultados de la determinación de la densidad del hormigón para diferentes proporciones de fibras de politereftalato de etileno (PET).

indican que las densidades para cada proporción son diferentes y disminuyen gradualmente a medida que aumenta la proporción de fibras PET en la mezcla de hormigón [$F(p=0)$]. Además, se observa una mayor porosidad en la matriz de hormigón al agregar una mayor cantidad de fibras PET. Por tanto, se considera útil su aplicación hasta un 4 % de fibras, donde la reducción de la densidad llega hasta 16.61 kg/m^3 respecto al hormigón patrón.

Resistencia a la compresión y flexión

La resistencia a la compresión es la propiedad más importante del hormigón, ya que determina su categorización (Sharma y Bansal 2016) y se define como la máxima resistencia que ofrece un espécimen de hormigón a una carga axial en una prensa de compresión, determinándose de acuerdo con las especificaciones de la norma ASTM C39 (ASTM 2021).

Los resultados experimentales de la resistencia a la compresión simple se presentan en la **figura 7**. Después de 28 días de curado, se observa un aumento de la resistencia en las muestras elaboradas con un 2 % de fibras PET hasta un 2.75 % (22.79 MPa) en comparación con la muestra patrón (22.18 MPa). Sin embargo, a medida que aumenta la concentración de fibras PET, la resistencia a la compresión tiende a disminuir. Por tanto, es aceptable utilizar hasta un 4 % de fibras PET donde la resistencia reportada es de 20.90 MPa. Para proporciones superiores al 4 % de PET, la resistencia se encuentra por debajo del diseño requerido. El análisis de varianza [$F(p=0)$] y la prueba de Tukey muestran que las resistencias a la compresión para cada proporción son diferentes en todos los casos. Además, la resistencia a la compresión se relaciona directamente con la densidad ($r = 0.962$).

Respecto de la resistencia a la flexión del hormigón o módulo de ruptura, esta comúnmente se

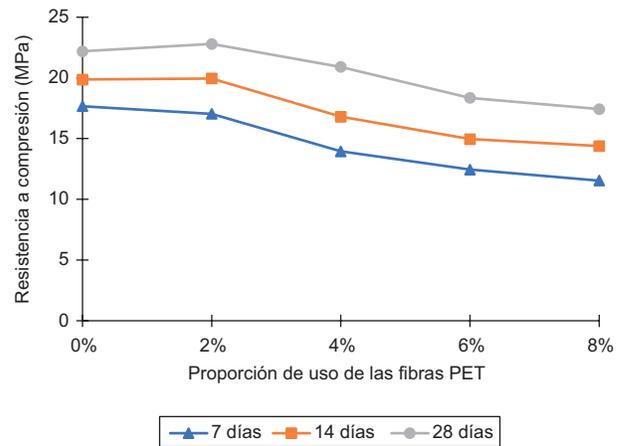


Fig. 7. Resultados de la resistencia a la compresión simple del hormigón para diferentes proporciones de fibras de politereftalato de etileno (PET) y días de curado.

determina a partir de la resistencia a la compresión simple mediante correlaciones o modelos empíricos. Por ejemplo, algunos estudios proponen una correlación de 0.6178 veces la raíz cuadrada de la resistencia a la compresión simple del hormigón para estimar su módulo de ruptura en MPa (Ojeda 2021). Para pavimentos rígidos, el ACI 363R (ACI 2010) establece que el módulo de ruptura puede determinarse como 0.62 a 0.99 veces la raíz cuadrada de la resistencia a la compresión simple en MPa, en este estudio se ha considerado un valor de 0.62. Asimismo, la resistencia a la flexión del hormigón puede ser evaluada directamente mediante el ensayo normalizado por la ASTM C78 (ASTM 2016) para diseño de pavimentos rígidos, aplicando la carga en los tercios y forzando la falla en el tercio central de la viga.

La **figura 8** presenta los resultados de la resistencia a la flexión del hormigón. Se puede observar que después de 28 días de curado, la resistencia a la flexión aumenta progresivamente desde 2.34 MPa (para el 0 % de PET) hasta 2.90 MPa (para el 4 % de PET) y 3.19 MPa (para el 6 % de PET), lo que representa incrementos del 23.9 % y 36.3 %, respectivamente. Por tanto, las proporciones del 4 % y 6 % de PET son aceptables para el diseño de pavimentos rígidos. Sin embargo, como se ha analizado anteriormente, al utilizar un 6 % de PET se obtiene una resistencia a la compresión simple por debajo de la requerida. En consecuencia, el uso de fibras PET es aceptable hasta un 4 %, dado que supera el mínimo de resistencia a la flexión requerida estimada a 2.84 MPa. Al realizar el análisis de varianza [$F(p=0)$] y la prueba de Tukey se puede concluir que, en al menos una proporción,

el promedio de resistencia a la flexión difiere significativamente de los demás. Además, las resistencias a la flexión para las proporciones del 2 %, 4 % y 8 % presentan un comportamiento similar, al igual que las proporciones del 4 % y 6 %.

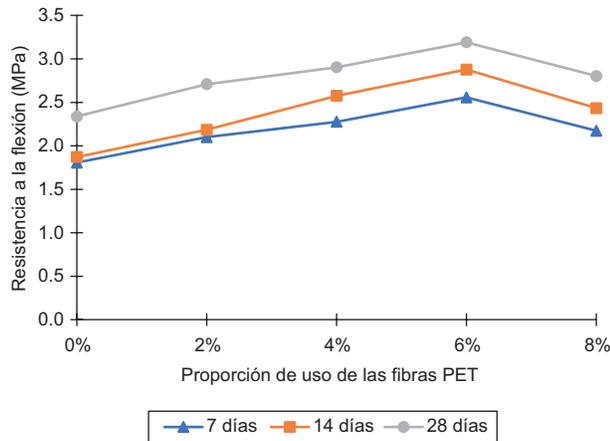


Fig. 8. Resultados de la resistencia a la flexión del hormigón para diferentes proporciones de fibras de politereftalato de etileno (PET) y días de curado.

DISCUSIÓN

Se ha demostrado a través del estudio realizado que el uso de fibras PET en el hormigón mejora las propiedades de resistencia a la compresión hasta una proporción del 4 %, y la resistencia a la flexión hasta el 6 %, cumpliendo con las especificaciones técnicas requeridas. Más allá del 6 % se presenta una disminución significativa en las propiedades de resistencia, el cual ha sido corroborado por estudios previos en que proporciones superiores al 10 % (en reemplazo del agregado fino) causan una disminución importante en todos los parámetros relacionados con la resistencia (Azhdarpour et al. 2016). Por otro lado, Małek et al. (2020) encontraron mejoras en las propiedades de resistencia a la compresión y a la flexión del hormigón al incorporar fibras de polipropileno recicladas de 31 mm de longitud y 1 mm de diámetro en una proporción del 1 % en peso de cemento. Asimismo, otro estudio ha reportado mejoras en la resistencia a la carga de impacto y en la capacidad de absorción de energía de losas que contienen fibras PET (Al-Hadithi et al. 2019).

En estudios recientes se han observado beneficios en el uso de fibras PET para elementos sometidos a flexión, debido a que mejoran la carga de

agrietamiento en vigas de hormigón cuando se agregan estas fibras (Mohammed y Rahim 2020). Esto se debe a su capacidad para controlar y puentear fisuras, lo que proporciona más ductilidad al hormigón y limita las fisuras causadas por retracción (Kim et al. 2010, Foti 2019). Algunos estudios han reportado incrementos en la resistencia a la flexión del hormigón adicionado con fibras PET recicladas, alcanzando hasta el 6 % (Meza de Luna y Shaikh 2020), mientras que otros han determinado aumentos del 30.2 % en la resistencia a la flexión cuando se usan botellas PET trituradas (Dawood et al. 2021). Estos resultados son similares a los encontrados en el presente estudio. Por tanto, el uso de fibras PET en el hormigón mejora su comportamiento mecánico a la compresión (Ojeda et al. 2020) y la flexión, superando en desempeño al hormigón convencional (Olarte 2022).

Según los resultados del estudio, se observó una reducción en la densidad del hormigón de entre el 1.83 % y el 8 % al utilizar fibras PET en la mezcla en comparación con la muestra patrón. De manera similar, otros estudios demostraron una disminución del 1.1 % en el peso del hormigón seco al reemplazar la arena por botellas PET trituradas de 1-1.5 mm de espesor y tamaño de 4-0.075 mm en una proporción del 10 % (Almeshal et al. 2020). Asimismo, otro estudio determinó que la incorporación de fibras PET recicladas en el hormigón produjo una reducción insignificante en el peso volumétrico, con una diferencia del 1 % al 4 % en comparación con las muestras testigo (Meza et al. 2021). En general, la densidad del hormigón disminuye gradualmente a medida que aumenta la cantidad de fragmentos de plástico en la mezcla (Azhdarpour et al. 2016). Esto se debe a que la presencia de fibras PET en el hormigón aumenta su porosidad reduciendo así la densidad (Bui et al. 2018).

En el estudio también se observó una reducción de la trabajabilidad del hormigón y esta reducción se incrementa a medida que aumenta la fracción del volumen de fibra en la mezcla (Fadhil y Yaseen 2015, Małek et al. 2020), afectando negativamente la consistencia del hormigón (Christ et al. 2019). Asimismo, el aumento de macrofibras poliméricas en el hormigón reduce aún más la trabajabilidad, requiriéndose el uso de un aditivo superplastificante para lograr el valor de asentamiento deseado (Macedo y Lorenzetti 2021). En el presente estudio, el asentamiento del hormigón fresco se redujo significativamente hasta un 47 % a la proporción del 8 % de PET. Por tanto, para mantener el asentamiento dentro del rango plástico trabajable, se recomienda utilizar una proporción máxima del 4 % de PET. Estudios similares indican que el hormigón

y las fibras de PET se mezclan fácilmente hasta una proporción volumétrica del 3 % (Ochi et al. 2007) y otros informes señalan que se han alcanzado asentamientos entre 97 y 80 mm utilizando proporciones pequeñas (Thomas y Moosvi 2020).

CONCLUSIONES

La generación de residuos PET sigue incrementándose a nivel mundial y se considera un potencial contaminante del ambiente. En este estudio experimental se propone el uso de estos residuos en el hormigón convencional para elementos estructurales sometidos a compresión y flexión. Se evaluaron en laboratorio las propiedades del hormigón fresco y endurecido con la adición de diferentes proporciones de fibras PET de dimensiones 2 a 3 mm de ancho por 30 mm de largo, y se sugiere que su aplicación sea de hasta un 4 % respecto al peso del cemento.

Se evaluaron las propiedades mecánicas del hormigón convencional con la adición de fibras PET, observándose mejoras en las resistencias a la compresión y la flexión. El valor de la resistencia a la compresión del hormigón aumentó a 22.79 MPa con una adición del 2 % de fibras, mientras que la resistencia a la flexión alcanzó 3.19 MPa con una adición del 6 % de fibras después de 28 días. En consecuencia, se concluye que es adecuado incorporar fibras PET recicladas en el hormigón hasta un 4 % con una dosificación de 15.78 kg/m³, cumpliendo así con el diseño requerido para hormigón convencional de 20 MPa.

La adición de fibras PET recicladas al hormigón disminuye su trabajabilidad y densidad en proporción directa al aumento de la cantidad de fibras añadidas. En el estudio experimental se encontraron asentamientos en el rango plástico, con mediciones de 93 mm a 0 % y 80 mm el 4 % de fibras PET. Además, se determinó una reducción de la densidad del hormigón, de 2254.45 kg/m³ al 0 % hasta 2237.83 kg/m³ al 4 % de PET. Por tanto, se recomienda no superar la proporción del 4 % de fibras PET recicladas, a efecto de mantener las resistencias dentro de los rangos permisibles previamente establecidos.

AGRADECIMIENTOS

Al Laboratorio de Construcciones de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional del Altiplano Puno, por el apoyo en la realización del presente estudio.

REFERENCIAS

- Abdulridha M.A., Salman M.M. y Banyhussan Q.S. (2020). Prediction the strength of fibered reinforced concrete pavement using response surface methodology: Parametric study. Conference Series: Materials Science and Engineering 881, 012180. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/881/1/012180>
- ACI (1991). ACI Committee 211.1-91. Standard practice for selecting proportions for normal, heavyweight, and mass concrete. American Concrete Institute. Farmington Hills, Michigan, EUA, 38 pp.
- ACI (2010). ACI Committee 363R-10. Report on high-strength concrete. American Concrete Institute. Farmington Hills, Michigan, EUA, 69 pp.
- Aghayan I. y Khafajeh R. (2019). Recycling of PET in asphalt concrete. En: Use of recycled plastics in eco-efficient concrete. (F. Pacheco-Torgal, Ed.). Elsevier, Amsterdam, Holanda, pp. 269-285. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-102676-2.00012-8>
- Al-Hadithi A.I., Noaman A.T. y Mosleh W.K. (2019). Mechanical properties and impact behavior of PET fiber reinforced self-compacting concrete (SCC). Composite Structures 224, 111021. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111021>
- Ali B., Qureshi L.A. y Kurda R. (2020). Environmental and economic benefits of steel, glass, and polypropylene fiber reinforced cement composite application in jointed plain concrete pavement. Composites Communications 22, 100437. <https://doi.org/10.1016/j.coco.2020.100437>
- Almeshal I., Tayeh B.A., Alyousef R., Alabduljabbar H. y Mohamed A.M. (2020). Eco-friendly concrete containing recycled plastic as partial replacement for sand. Journal of Materials Research and Technology 9 (3), 4631-4643. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.02.090>
- AlShareedah O. y Nassiri S. (2021). Pervious concrete mixture optimization, physical, and mechanical properties and pavement design: A review. Journal of Cleaner Production 288, 125095. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125095>
- ASTM (2012). ASTM C143/C143M-12. Standard test method for slump of hydraulic-cement concrete. American Society for Testing and Materials. West Conshohocken, Montgomery, Filadelfia, EUA, 4 pp.
- ASTM (2016). ASTM C78/C78M-16. Standard test method for flexural strength of concrete (using simple beam with third-point loading). American Society for Testing and Materials. Manual. West Conshohocken, Montgomery, Filadelfia, EUA, 4 pp.
- ASTM (2018). ASTM C33/C33M-18. Standard specification for concrete aggregates. American Society for Testing and Materials. Manual. West Conshohocken, Montgomery, Filadelfia, EUA, 8 pp.

- ASTM (2020). ASTM C595/C595M-20. Standard specification for blended hydraulic cements. American Society for Testing and Materials. Manual. West Conshohocken, Montgomery, Filadelfia, EUA, 8 pp.
- ASTM (2021). ASTM C39/C39M-21. Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens. American Society for Testing and Materials. West Conshohocken, Montgomery, Filadelfia, EUA, 8 pp.
- Azhdarpour A.M., Nikoudel M.R. y Taheri M. (2016). The effect of using polyethylene terephthalate particles on physical and strength-related properties of concrete; a laboratory evaluation. *Construction and Building Materials* 109, 55-62. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.01.056>
- Bozyigit I., Bulbul F., Alp C. y Altun S. (2021). Effect of randomly distributed pet bottle strips on mechanical properties of cement stabilized kaolin clay. *Engineering Science and Technology, an International Journal* 24 (5), 1090-1101. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2021.02.012>
- Bui N.K., Satomi T. y Takahashi H. (2018). Recycling woven plastic sack waste and PET bottle waste as fiber in recycled aggregate concrete: An experimental study. *Waste Management* 78, 79-93. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.05.035>
- Chan R., Santana M.A., Oda A.M., Paniguel R.C., Vieira L.B., Figueiredo A.D. y Galobardes I. (2019). Analysis of potential use of fibre reinforced recycled aggregate concrete for sustainable pavements. *Journal of Cleaner Production* 218, 183-191. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.221>
- Christ R., Pacheco F., Ehrenbring H., Quinino U., Mancio M., Muñoz Y. y Tutikian B. (2019). Study of mechanical behavior of ultra - high performance concrete (UHPC) reinforced with hybrid fibers and with reduced cement consumption. *Revista Ingeniería de Construcción* 34 (2), 159-168. <https://doi.org/10.4067/S0718-50732019000200159>
- Cui X., Liu G., Wang C. y Qi Y. (2019). Effects of PET fibers on pumpability, shootability, and mechanical properties of Wet-Mix Shotcrete. *Advances in Civil Engineering* 2019, 2756489. <https://doi.org/10.1155/2019/2756489>
- Dawood A.O., AL-Khazraji H. y Falih R.S. (2021). Physical and mechanical properties of concrete containing PET wastes as a partial replacement for fine aggregates. *Case Studies in Construction Materials* 14, e00482. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00482>
- Fadhil S. y Yaseen M. (2015). The production of economical precast concrete panels reinforced by waste plastic fibers. *American Journal of Civil Engineering and Architecture* 3, 80-85.
- Fioriti C., Segantini R., Pinheiro J., Akasaki J. y Spósito F. (2020). Bloques de mampostería de hormigón liviano fabricados con caucho de neumáticos y metacaolín. *Revista Ingeniería de Construcción* 35 (3), 295-307. <https://doi.org/10.4067/s0718-50732020000300295>
- Foti D. (2019). Recycled waste PET for sustainable fiber-reinforced concrete. En: *Use of recycled plastics in eco-efficient concrete*. (F. Pacheco-Torgal, Ed.). Elsevier, Amsterdam, Holanda, pp. 387-410. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102676-2.00018-9>
- Hameed A.M. y Fatah B.A. (2019). Employment the plastic waste to produce the light weight concrete. *Energy Procedia* 157, 30-38. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.11.160>
- Hao H., Bi K., Chen W., Pham T.M. y Li J. (2023). Towards next generation design of sustainable, durable, multi-hazard resistant, resilient, and smart civil engineering structures. *Engineering Structures* 277, 115477. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.115477>
- Hassouna F.M. y Jung Y.W. (2020). Developing a higher performance and less thickness concrete pavement: using a nonconventional concrete mixture. *Advances in Civil Engineering* 2020, 8822994. <https://doi.org/10.1155/2020/8822994>
- Hussain I., Ali B., Akhtar T., Jameel M.S. y Raza S.S. (2020). Comparison of mechanical properties of concrete and design thickness of pavement with different types of fiber-reinforcements (steel, glass, and polypropylene). *Case Studies in Construction Materials* 13, e00429. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00429>
- Khatab H.R., Mohammed S.J. y Hameed L.A. (2019). Mechanical properties of concrete contain waste fibers of plastic straps. *Conference Series: Materials Science and Engineering* 557, 12059. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/557/1/012059>
- Kim J.J., Park C.G., Lee S.W., Lee, S.W. y Won J.P. (2008). Effects of the geometry of recycled PET fiber reinforcement on shrinkage cracking of cement-based composites. *Composites Part B: Engineering* 39 (3), 442-450. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2007.05.001>
- Kim S.B., Yi N.H., Kim H.Y., Kim J.J. y Song Y.C. (2010). Material and structural performance evaluation of recycled PET fiber reinforced concrete. *Cement and Concrete Composites* 32 (3), 232-240. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.11.002>
- Macedo A. y Lorenzetti A. (2021). Behavior analysis of high strength concrete containing macro-polymeric fibers based on workability and mechanical properties. *Revista Ingeniería de Construcción* 36 (2), 142-156. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-50732021000200142>
- Małek M., Jackowski M., Łasica W. y Kadela M. (2020). Characteristics of recycled polypropylene fibers as an addition to concrete fabrication based on Portland cement. *Materials* 13 (8), 1-19. <https://doi.org/10.3390/ma13081827>

- Mercante I., Alejandrino C., Ojeda J.P., Chini J., Maroto C. y Fajardo N. (2018). Mortar and concrete composites with recycled plastic: A review. *Science and Technology of Materials* 30, 69-79. <https://doi.org/10.1016/j.stmat.2018.11.003>
- Meza A., Pujadas P., Montserrat L., Pardo-Bosch F. y Rubén L.C. (2021). Mechanical optimization of concrete with recycled PET fibres based on a statistical-experimental study. *Materials* 14 (2), 1-20. <https://doi.org/10.3390/ma14020240>
- Meza de Luna A. y Shaikh F.U. (2020). Anisotropy and bond behaviour of recycled polyethylene terephthalate (PET) fibre as concrete reinforcement. *Construction and Building Materials* 265, 120331. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120331>
- Mohammed A.A. y Rahim A.A. (2020). Experimental behavior and analysis of high strength concrete beams reinforced with PET waste fiber. *Construction and Building Materials* 244, 118350. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118350>
- Mohseni E., Kazemi M.J., Koushkbaghi M., Zehtab B. y Behforouz B. (2019). Evaluation of mechanical and durability properties of fiber-reinforced lightweight geopolymer composites based on rice husk ash and nano-alumina. *Construction and Building Materials* 209, 532-540. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.067>
- Neri M., Pilotelli M., Traversi M., Levi E., Piana E., Bannó M., Cuerva E., Pujadas P. y Guardo A. (2021). Conversion of end-of-life household materials into building insulating low-cost solutions for the development of vulnerable contexts: Review and outlook towards a circular and sustainable economy. *Sustainability* 13 (8), 1-21. <https://doi.org/10.3390/su13084397>
- Ochi T., Okubo S. y Fukui K. (2007). Development of recycled PET fiber and its application as concrete-reinforcing fiber. *Cement and Concrete Composites* 29 (6), 448-455. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2007.02.002>
- Ojeda J.P. (2021). A meta-analysis on the use of plastic waste as fibers and aggregates in concrete composites. *Construction and Building Materials* 295, 123420. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123420>
- Ojeda J.P. y Mercante I.T. (2021). Reciclaje de residuos plásticos para la producción de agregados livianos. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* 37, 489-499. <https://doi.org/10.20937/RICA.54081>
- Ojeda J.P., Mercante I.T. y Fajardo N.H. (2020). Diseño y ensayo de fibras plásticas recicladas para refuerzo de mortero. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* 36 (1), 55-62. <https://doi.org/10.20937/RICA.2020.36.53423>
- Olarte S. (2022). Estudio del comportamiento mecánico del concreto hidráulico: Adición de fibras y micro partículas de botellas plásticas. *Revista Ingeniería de Construcción* 37 (3), 435-443. <https://doi.org/10.7764/ric.00045.21>
- Rostami R., Zarrebini M., Mandegari M., Mostofinejad D. y Abtahi S.M. (2020). A review on performance of polyester fibers in alkaline and cementitious composites environments. *Construction and Building Materials* 241, 117998. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.117998>
- Sharma R. y Bansal P.P. (2016). Use of different forms of waste plastic in concrete - a review. *Journal of Cleaner Production* 112, 473-482. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.08.042>
- Shubbar S.D. y Al-Shadeedi A.S. (2017). Utilization of waste plastic bottles as fine aggregate in concrete. *Kufa Journal of Engineering* 8 (2), 132-146. <https://www.iasj.net/iasj/download/3e4ebf31139fc017>
- Subramani T. y Rahman A.F. (2017). An experimental study on the properties of PET fibre reinforced concrete. *International Journal of Application or Innovation in Engineering and Management* 6 (3), 58-66.
- Thomas L.M. y Moosvi S.A. (2020). Hardened properties of binary cement concrete with recycled PET bottle fiber: An experimental study. *Materials Today: Proceedings* 32, 632-637. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.025>
- Torres D.A., Bastidas J.G. y Ruge J.C. (2018). Reinforced concrete with synthetic fibers (PET+PP) for rigid pavement structures. *Memorias. Congreso Internacional de Innovación y Tendencias en Ingeniería. Bogotá, Colombia. 03 - 05 de octubre, 2018, 1-5 pp.* <https://doi.org/10.1109/CONIITI.2018.8587056>
- Yin S., Tuladhar R., Shi F., Combe M., Collister T. y Sivakugan N. (2015). Use of macro plastic fibres in concrete: A review. *Construction and Building Materials* 93, 180-188. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.105>
- Zhao Z., Xiao F. y Amirhanian S. (2020). Recent applications of waste solid materials in pavement engineering. *Waste Management* 108, 78-105. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.04.024>