

ESTUDIO COMPARATIVO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE CONCRETOS MODIFICADOS CON RESIDUOS PLÁSTICOS GRANULADOS Y NO GRANULADOS

Comparative study of the mechanical properties of modified concrete with pelletized and non-pelletized plastic waste

Óscar Felipe ARBELÁEZ PÉREZ*, Daniel BETANCUR MARTÍNEZ,
D'angelo Paolo CORREA VANEGAS y Crithian Gerley ESPELETA MARTÍNEZ

Universidad Cooperativa de Colombia, Calle 50 Número 40 – 74 Bloque 1, Medellín, 050016, Antioquia, Colombia.

*Autor para correspondencia: oscar.arbelaez@campusucc.edu.co

(Recibido: noviembre 2021; aceptado: abril 2023)

Palabras clave: sustentabilidad, concreto ligero, residuos de PET, concreto verde.

RESUMEN

Los residuos de tereftalato de polietileno (PET) y su baja tasa de reciclaje contribuyen al detrimento del ambiente, por lo que es necesario utilizarlos de diferentes maneras, por ejemplo, como materiales precursores en la preparación de hormigón. Este trabajo reporta las propiedades mecánicas de concretos preparados con reemplazos del 1.7 %, 3.4 % y 5 % de los agregados finos por residuos plásticos no granulados (plásticos triturados) y granulados. Un aumento de los residuos de PET granulados y no granulados fue directamente e inversamente al asentamiento, respectivamente. La densidad disminuyó con el aumento del contenido de reemplazo en los residuos de PET granulados y no granulados. El concreto elaborado con PET granulado presentó la mayor resistencia a la compresión, siendo la mezcla con 1.7 % de material granulado, la que presentó mayor resistencia a la compresión (96 % del material tradicional). Además, las mezclas que contenían 1.7 % de material no granulado tuvieron una menor resistencia a la compresión (76 %). Con base en los resultados, el concreto preparado que contiene residuos de PET granulados presenta una solución para la eliminación de residuos plásticos.

Key words: Sustainability, lightweight concrete, PET waste, green concrete.

ABSTRACT

Polyethylene terephthalate (PET) waste and its low recycling rate contribute to the detriment of the environment, it is therefore necessary to use PET waste in different ways, for example as precursor materials in concrete preparation. This work presents the preparation of concrete with pelletized and non pelletized PET waste as replacement by volume of 1.7%, 3.4% and 5% of fine aggregates. An increase of pelletized and non-pelletized PET waste was directly and inversely to slump, respectively. The density decreased with the increase in replacement content in pelletized and not pelletized PET waste. The concrete prepared with pelletized PET exhibited the highest compressive strength, being the concrete mix containing 1.7% of pelletized material, the one that exhibited the highest compressive strength (96% of the traditional material). Furthermore, the mixtures containing 1.7% of non-pelletized material achieved a lower compressive strength (76%). Based on the results, the prepared concrete containing pelletized PET waste presents a solution to plastic waste disposal.

INTRODUCCIÓN

Actualmente, grandes cantidades de desechos sólidos tales como plásticos, neumáticos, alimentos, estiércol animal y biomasa agroindustrial se producen a nivel mundial (Celik et al. 2019). Entre estos residuos, el plástico recibe un gran y creciente énfasis, debido a su escala de producción y su impacto ambiental negativo (Shams et al. 2021). Cada año se generan 381 millones de toneladas de desechos plásticos y se espera que esta cantidad se duplique para el año 2034 (Zhao et al. 2022). El polipropileno, el polietileno, el poliuretano, el cloruro de polivinilo, el poliestireno, el tereftalato de polietileno y las resinas fenólicas son los más utilizados, como plásticos de un sólo uso (Mohammed y Mohammed. 2021).

Por su parte, el tereftalato de polietileno, comúnmente conocido como PET, es un polímero termoplástico de bajo costo, liviano y de alta durabilidad (Geyer et al. 2017). Dado su elevado uso en la producción de botellas de refrescos, envases de alimentos y productos farmacéuticos, así como en la industria de la construcción, embalaje y transporte (Chu et al. 2021) hoy por hoy es el cuarto polímero de mayor producción a nivel mundial (Rorrer et al. 2019).

Los productos preparados con PET, al ser materiales de un sólo uso, generan una gran cantidad de residuos que emergen como un problema significativo de contaminación ambiental alrededor de todo el mundo (Ersan y Dogan 2021). La gestión actual de los residuos plásticos se basa en gran medida en el vertido, la incineración y el reciclaje; salvo la última solución, las otras dos causan efectos devastadores para el ambiente.

Para que este tipo de residuo se degrade deben pasar al menos 180 años, por lo cual el vertimiento no es una solución sostenible, puesto que termina afectando a las fuentes hídricas y los océanos. Un efecto similar ocurre con la incineración, puesto que libera gases contaminantes como dióxido de carbono, monóxido de carbono y óxidos de nitrógeno, lo cual impacta de forma negativa la calidad del aire (Yang et al. 2021).

Por lo anteriormente expuesto, el reciclaje de desechos plásticos surge como una opción de valor real que podría promover beneficios económicos y ambientales e impulsar la transición a una economía circular de los plásticos (Gu y Ozbakkaloglu 2016). Hasta la fecha, se han desarrollado cuatro métodos de reciclaje para los residuos plásticos, a saber, primario, secundario, terciario y cuaternario.

Las técnicas de reciclado primario y secundario, que gozan de gran reconocimiento y aplicación en todo el mundo, están mayoritariamente vinculadas al

reciclaje mecánico de residuos plásticos. Por un lado, el reciclaje primario utiliza plásticos de desecho que tienen características similares al original e implica la reutilización de residuos limpios o semi limpios; esta es una técnica de uso popular e incluye el moldeo por inyección y otras técnicas de reciclaje mecánico (Xayachak et al. 2022).

Por otro lado, en el reciclaje secundario se transforma el material por medios mecánicos para productos de usos menos exigentes. Los pasos involucrados en el reciclaje secundario suelen ser corte y separación de contaminantes y de escamas por flotación. Después de estos pasos, el material plástico de un sólo polímero se procesa y se tritura para formar una forma granulada. Luego el producto es recolectado, almacenado y comercializado después de la adición de pigmentos y aditivos (Singh et al. 2017).

A pesar de que los métodos de reciclaje primario y secundario son ampliamente utilizados para la recuperación de residuos plásticos, el producto final que emerge es de baja calidad en comparación con los de su uso original y no es posible emplearlos, por ejemplo, para la producción de envases de alimentos y bebidas (Lee et al. 2021).

Por su parte, el reciclado terciario incluye la despolimerización de los residuos plásticos en sus monómeros constituyentes por medio de fuentes químicas y térmicas (Dai et al. 2022). Por una parte, el reciclaje químico, conocido comúnmente como quimiolisis, emplea solventes para transformar los desechos plásticos en productos de bajo peso molecular (Jiang et al. 2022). Por otra parte, el reciclaje térmico implica o bien la degradación térmica de los polímeros en atmósfera inerte, conocida como pirólisis, o bien la oxidación parcial (utilizando aire o vapor) de los residuos plásticos en gases combustibles (Putra et al. 2022).

En el reciclaje cuaternario de plásticos, estos se procesan para producir energía a través de su incineración. Sin embargo, como se comentó previamente, existen una serie de preocupaciones ambientales asociadas con las emisiones de contaminantes.

En las anteriores formas de reciclaje hay luces y sombras. Ahora surge la posibilidad de utilizar residuos plásticos en la industria de la construcción (Kumar et al. 2020), (Alqahtani y Zafar 2021), puntualmente como reemplazo de los agregados en la producción de concretos (Basha et al. 2020). Diferentes reportes como los de Marzouk et al. (2007), Rahmani et al. (2013), y Sivakrishna et al. (2019), informan sobre el efecto que tiene su incorporación en reemplazo de los agregados finos y gruesos.

En efecto, el uso de plástico en la elaboración de concretos tiene el potencial para absorber el alto

volumen de residuos plásticos generados y mitigar los problemas mencionados, así como reducir el elevado consumo de materiales precursores no renovables, tales como los agregados finos provenientes de recursos naturales (Saikia y De Brito 2012). A la par, se podrían superar los inconvenientes asociados con la preparación de concretos livianos que incorporan agregados livianos naturales o manufacturados, tales como piedra pómez (Karthika et al. 2021) o escoria volcánica (Naderi et al. 2018), los cuales tienen altos costos de extracción, transporte, retracción excesiva por secado y alta absorción de agua.

La mayor parte de los reportes de la literatura sobre la incorporación de residuos plásticos se ha centrado en introducirlos en las mezclas de concreto, después de clasificarlos, limpiarlos y triturarlos, sin etapas térmicas o químicas previas que alteren sus propiedades físicas (Kim et al. 2010). Los principales hallazgos de los estudios de incorporación de residuos plásticos triturados indican que el asentamiento, la densidad, la resistencia a la compresión, la resistencia a la tracción, la resistencia a la flexión y el módulo de elasticidad disminuyen significativamente con el aumento del contenido de plástico (Almohana et al. 2022).

Se ha reportado que un reemplazo de los agregados finos entre 0 % y 20 % por PET triturado genera disminuciones entre 9 % y 62 % para el asentamiento y entre 43 % y 95 % para la resistencia a la compresión, respectivamente (Saikia y Brito 2014). Asimismo, la resistencia a la compresión y a la flexión se ve disminuida entre el 50 % y el 90 % y entre el 17.9 % al 88 % en concretos preparados con reemplazos entre 0 % y 100 % de los agregados finos por PET (Akçaözoglu et al. 2010). De igual manera, se ha reportado que cuando el reemplazo de los agregados finos por residuos de PET triturado aumenta entre 0 % y 5 %, la resistencia a la compresión disminuye ligeramente, de hecho, si la cantidad de PET supera el 5 %, las propiedades mecánicas del concreto disminuyen de manera muy significativa (Frigione 2010).

Por su parte, Wang et al. (2009), informaron que el asentamiento del concreto preparado con agregado ligero de residuos de PET, a un nivel de reemplazo del 75 % de los agregados finos, fue un 46 % mayor en comparación con el concreto convencional, tendencia atribuida a la forma a la forma esférica y la textura de la superficie lisa de las partículas de plástico. Como se observa, diferentes reportes muestran el efecto que tiene la incorporación de PET triturado en las propiedades del concreto, sin embargo, es escasa la literatura que informe sobre el efecto que tiene

la incorporación de plástico previamente tratado en las propiedades mecánicas del concreto modificado.

Recientemente, Alqahtani et al. (2017) prepararon e incorporaron agregados sintéticos elaborados a partir de 30 % de polietileno lineal de baja densidad y 70 % de arenas de dunas como reemplazo de los agregados finos en la preparación de concretos modificados. A su vez, los autores reportaron que para reemplazos del 100 % de los agregados finos, se encontró una reducción de la resistencia a la compresión entre el 40 % y el 53 %. Asimismo, cuando los mencionados agregados sintéticos se incorporaron como reemplazos del 25 %, 50 %, 75 % y 100 % de los agregados finos, los autores reportaron una disminución en la resistencia a la compresión, a la flexión y a la tracción. A su vez, lo mismo ocurre en el módulo elástico, cuyos valores se encuentran entre un 15 % y un 62 %, entre un 27 % y un 44 %, entre un 12 % y un 31 % y entre un 11 % a 54 %, cuando el porcentaje de reemplazo aumentó entre 25 % y 100 %. Los autores señalaron que el reemplazo total de los agregados finos tiene un efecto negativo sobre las propiedades mecánicas (Alqahtani et al. 2017).

Dado el efecto que tiene la incorporación de agregados sintéticos preparados por combinación de plásticos y arenas en las propiedades de concretos modificados, además de la escasa literatura reportada en esta línea de investigación, en este trabajo se presenta un estudio comparativo de las propiedades mecánicas de concretos preparados con reemplazos del 1.7 %, 3.4 % y 5 % de los agregados finos con plásticos triturados (no granulados) y con gránulos de residuos plásticos procesados térmicamente, obtenidos mediante moldeamiento térmico de residuos de PET (granulación). En efecto, se espera que la incorporación de material granulado no sólo permita mejorar las propiedades mecánicas en relación con el material no granulado, sino que se convierta en una estrategia de eliminación de residuos plásticos y reduzca los daños ambientales por el uso de recursos naturales.

MATERIALES Y MÉTODOS

Caracterización de los materiales precursores

El **cuadro I** presenta las características de los materiales pétreos empleados en la preparación del concreto tradicional y modificado.

Preparación y caracterización del material granulado y no granulado

El material granulado fue suministrado por la empresa Químicos SAS, que lo prepara a partir de

CUADRO I. CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES PRECURSORES.

Característica	Método	Agregados finos	Agregados gruesos	Referencia
Masa unitaria suelta (kg/m^3)	ASTMC29	1420	1650	(ASTM 2017)
Masa unitaria compacta (kg/m^3)	ASTMC29	1600	1780	(ASTM 2017)
Densidad aparente (kg/m^3)	ASTMC127	2430	2310	(ASTM 2017)
Absorción (%)	ASTMC127	1.75	3.73	(ASTM 2017)
Tamaño máximo (mm)	ASTMC136	n.a	25	(ASTM 2017)
Tamaño máximo nominal (mm)	ASTMC136	n.a	19	(ASTM 2017)

n.a. = no aplica.

residuos plásticos, los cuales se funden a 150°C hasta formar una pasta homogénea que se comprime en una prensa hidráulica y se extruye para formar gránulos del material plástico, como los mostrados en la **figura 1**. Por otra parte, el material no granulado (**Fig. 1**), provino de residuos de PET de baja densidad, el cual fue triturado utilizando un molino de cuchillas de 14 kW de potencia.



Fig. 1. Plástico granulado (izquierda) y plástico triturado (derecha).

El análisis granulométrico de los residuos plásticos se llevó a cabo utilizando una tamizadora eléctrica Tyler Rx-29, tal como lo describe la metodología ASTM C136 (ASTM 2014). Para la preparación de las mezclas de concreto, se utilizó el material retenido entre los tamices 4.75 mm (i.e. No. 8) y 2.36 mm (i.e. No. 4). La densidad aparente del material granulado y no granulado, calculada tal como lo describe la norma técnica ASTM C29 (ASTM 2007), tuvo un valor de 46.903 kg/m^3 y 23.584 kg/m^3 , respectivamente.

Diseño de las mezclas de concreto

El cemento Argos de uso general empleado en la preparación de las mezclas de concreto presentó una densidad de 3045 kg/m^3 , calculada tal como lo describe la metodología ASTM C188 (ASTM 2017). A su vez, las mezclas de concreto tradicional y modi-

ficado se diseñaron tal como lo describe la Asociación Americana del Concreto en su norma ACI 211 (ACI 2002), empleando una relación de 0.6 entre el agua y el cemento y con una resistencia de 21 MPa. Así, en total se diseñaron siete mezclas de concreto, una de concreto tradicional y seis de concreto con sustituciones del 1.7 %, 3.4 % y 5.0 % en volumen de los agregados finos por plástico granulado y plástico no granulado. El diseño de las mezclas de concreto se presenta en el **cuadro II**.

CUADRO II. CANTIDADES DE MATERIALES DE CADA UNA DE LAS MEZCLAS ELABORADAS. KG DE MATERIAL PARA PREPARAR UN METRO CÚBICO DE CONCRETO.

Referencia mezcla	% PET	Tipo de material	Agregado fino (kg)	Residuos de PET (kg)
R	0	0	1209	0
P17	1.7	P	1188	20.5
T17	1.7	T	1188	20.5
P34	3.4	P	1167.9	41.1
T34	3.4	T	1167.9	41.1
P50	5.0	P	1148.55	60.45
T50	5.0	T	1148.55	60.45

R: Concreto de referencia. PET: tereftalato de polietileno. P: PET granulado, T: PET triturado. Las mezclas fueron preparadas utilizando 377 kg de cemento y 404 kg de agregados gruesos por cada metro cúbico de concreto.

Preparación de mezclas y cilindros de concreto

La elaboración de las mezclas de concreto tradicional y modificado, la medida del asentamiento y el curado de los especímenes se desarrolló tal como está descrito en la metodología ASTM C192 (ASTM 2016). Fue así como la preparación de las mezclas de concreto se inició mezclando 4 minutos el agregado grueso humedecido previamente por 24 horas y el 75 % del agua total de diseño; posteriormente se

añadió el cemento, los agregados finos, el agua de diseño restante y el material plástico. La mezcla se agitó por 4 minutos más.

De la mezcla obtenida se midió el asentamiento, tal como lo describe la metodología ASTM C143 (ASTM 2015). Se prepararon en total tres cilindros de 0.15 m de diámetro y 0.3 m de altura por cada una de las mezclas preparadas acorde con la metodología ASTM C31 (ASTM 2012). Los cilindros preparados se muestran en la **figura 2**. Una vez que transcurrieron las 24 ± 2 horas de elaborados los especímenes, estos se sacaron de los cilindros y se sumergieron completamente en agua por 28 días para garantizar el proceso normal de fraguado, tal como se describe en la metodología ASTM C31 (ASTM 2012).



Fig. 2. Especímenes cilíndricos de concreto.

Evaluación de las propiedades mecánicas

Transcurridos 28 días, se midió la masa de los especímenes de concreto en la condición de saturados y secos en la superficie, lo cual permitió determinar la densidad de los especímenes, como la relación entre la masa y el volumen. La resistencia a la compresión se determinó empleando un equipo de compresión simple Pilot, con 0.5 KN/s como velocidad de carga, tal como lo describe la metodología ASTM C39 (ASTM 2003)

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de la **figura 3** muestran que el asentamiento de las mezclas tiene un comportamiento diferente cuando estas se preparan con material granulado o triturado (no granulado). Para las mezclas preparadas con no granulado se observó

una reducción significativa en el asentamiento con el aumento en el contenido de residuos plásticos triturados. Los resultados mostraron que las mezclas preparadas con reemplazos de plástico triturado de 1.7 %, 3.4 % y 5 % generan disminuciones del 3.1 %, 6.3 % y 43 % en el asentamiento, con respecto al concreto tradicional, el cual presentó un asentamiento de 15 cm. Estos resultados están en línea con los reportes de otros autores como Záleská et al. (2018) y Dawood et al. (2021), quienes han informado que el asentamiento de las mezclas de concreto está estrechamente relacionado con la forma de las partículas. Los autores informan que las partículas con bordes afilados (residuos de plástico triturado) disminuyen el asentamiento, fenómeno asociado con la forma irregular y la textura rugosa de los residuos de plástico triturado, lo cual aumenta el área superficial de las partículas de agregado cubiertas por la pasta de cemento, tal como lo observaron Rahmani et al. (2013).

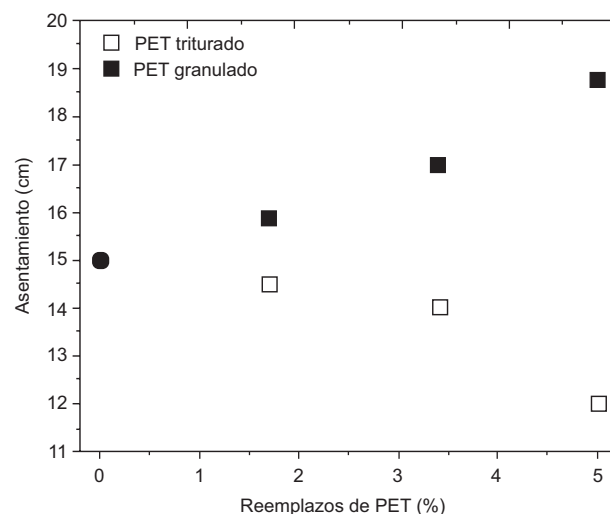


Fig. 3. Asentamiento de las mezclas de concreto. PET: tereftalato de polietileno

Asimismo, los resultados de la **figura 3** muestran que las mezclas de concreto preparadas con el residuo granulado tuvieron una relación directa entre el asentamiento y el contenido de plástico; para estas mezclas, se observaron incrementos del 6 %, 13 % y 25 %, para reemplazos del 1.7 %, 3.4 % y 5 %, respectivamente, comportamiento atribuido a la forma lisa y esférica del material granulado que genera una disminución de la fricción y, por tanto, un aumento del asentamiento. Lo anterior acorde con los resultados previos de Venitez et al. (2020),

quienes reportaron una tendencia directamente proporcional entre el aumento en el contenido de plástico y el asentamiento, resultado de su forma regular. Los resultados encontrados en el asentamiento y la forma de los agregados están en concordancia con los reportes de Saikia y Brito (2014), quienes emplearon diferentes formas de agregado preparado a partir de PET reciclado. Los autores afirmaron que, tanto las partículas trituradas con bordes más afilados como las partículas angulares, disminuyen significativamente la trabajabilidad, al aumentar su incorporación, mientras que las partículas en forma de gránulos con forma casi esférica y textura superficial lisa aumentan ligeramente el asentamiento. A diferencia de los reportes de Alqahtani et al. (2017), en este trabajo se prepararon los gránulos a partir del 100 % de plástico reciclado, lo que puede permitir un mayor aprovechamiento de este tipo de residuos.

La **figura 4** muestra los resultados de la densidad en estado endurecido (28 días) de los especímenes de concreto donde se observa que, independientemente de la forma de los agregados (triturados o granulados), la incorporación de plástico en reemplazo de los agregados disminuye la densidad del concreto, comportamiento relacionado con la naturaleza liviana del agregado plástico. En efecto, cuando se reemplaza el 1.7 %, 3.4 % y 5 % de los agregados finos, se disminuye la densidad en 2.5 %, 3 % y 6.5 % para el material triturado y en 0.5 %, 1 % y 2 % para el material granulado, fenómeno atribuido a la menor densidad del plástico triturado en relación con la del plástico granulado. Los resultados encontrados en este trabajo son acordes con los reportes de Saikia

et al. (2012), quienes indican que la disminución en la densidad del concreto modificado con residuos plásticos depende del contenido y de la forma del agregado plástico. Los autores informaron que la tendencia en la reducción de la densidad sigue el orden: agregado de plástico en gránulos < fracción fina de agregado de plástico en escamas < fracción gruesa de agregado de plástico en escamas.

De acuerdo con Hannawi et al. (2010), el aumento en el contenido de agregados plásticos triturados no granulados en las mezclas de concreto modificado, resultó en una disminución de la densidad del material. Los resultados obtenidos indican que la densidad disminuyó en un 19 % y en un 24 % en comparación con el concreto tradicional, cuando se reemplazó el 50 % de los agregados finos por residuos plásticos de polietileno tereftalato y policarbonato, respectivamente. Las densidades informadas por los autores fueron inferiores a 2000 kg/m^3 , lo que se encuentra dentro del rango de la densidad del concreto ligero estructural y se atribuyó principalmente a las diferencias en el peso específico del PET (547 kg/m^3) y del policarbonato (612 kg/m^3).

La **figura 5** muestra los resultados de la resistencia de los especímenes de concreto. En ella se observa que la resistencia a la compresión del concreto es inversamente proporcional al contenido de plástico no granulado o granulado. Se encuentra una mayor resistencia para el material granulado que para el material no granulado. Para reemplazos del 1.7 %, 3.4 % y 5 % de agregados finos por plástico granulado, se encontraron resistencias del 96 %, 87 % y 86 % con

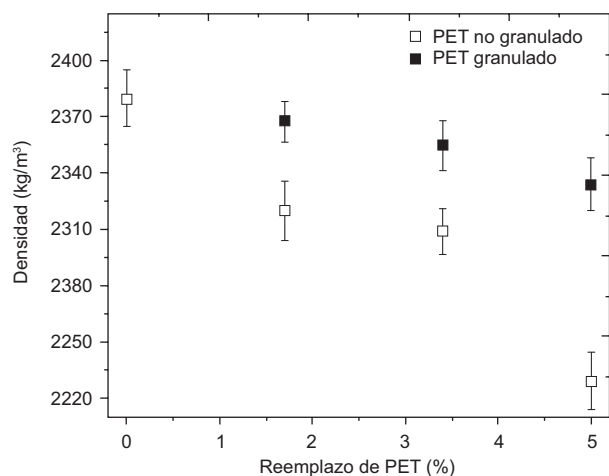


Fig. 4. Densidad de las mezclas de concreto. PET: tereftalato de polietileno. La desviación estándar se muestra como barras de error.

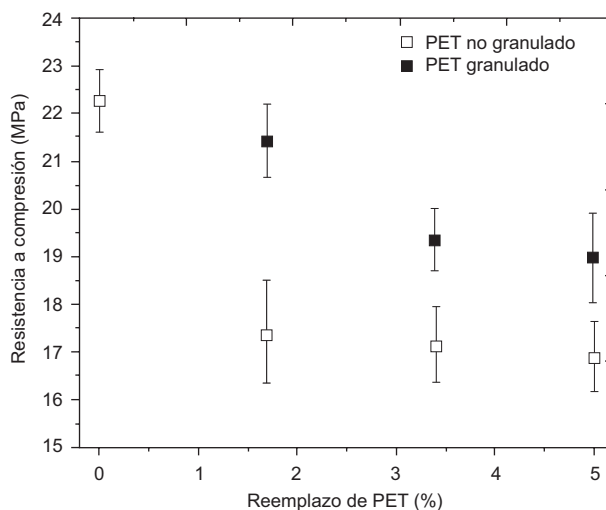


Fig. 5. Resistencia a compresión de las mezclas de concreto. PET: tereftalato de polietileno. La desviación estándar se muestra como barras de error.

respecto al concreto de referencia (22.4 MPa, 0 % de residuos plásticos), mientras que para estos mismos porcentajes se encontraron resistencias de 78 %, 76 % y 75 % del tradicional, cuando se incorporó el material no granulado, lo cual indica que el proceso de granulación genera una mejora significativa de la resistencia a la compresión, en comparación con el material triturado.

Los resultados encontrados en este trabajo están en concordancia con los reportes de Zaleska et al. (2018), quienes informaron que para concretos con reemplazo del 10 %, 20 %, 30 %, 40 % y 50 % de los agregados finos por residuos plásticos triturados (no granulados) se encontraron resistencias del 82 %, 59 %, 26 %, 9 % y 7 %, respectivamente. De la misma manera, Saikia et al. (2014), reportaron resistencias de 76 %, 5 % y 38 %, del concreto tradicional, para reemplazos del 5 %, 10 % y 15 %, respectivamente. A su vez, Choi et al. (2005) y Wang et al. (2009), afirman que la reducción en la resistencia está directamente relacionada con la baja resistencia de la interfase formada entre los residuos de plástico y la matriz de la pasta de cemento, asociada con la diferencia entre la naturaleza orgánica del plástico y la naturaleza inorgánica de los materiales pétreos precursores.

Asimismo, la reducción de la resistencia a la compresión está relacionada con la naturaleza hidrófoba existente en la matriz de material plástico que impide una buena adherencia y genera un efecto pared. En este caso, Choi et al. (2005) y Wang et al. (2009), evidenciaron la presencia de una estructura fibrosa que funciona como puentes de reticulación, cambiando el modo de falla, donde desaparece cualquier formación de grietas debido a la deformabilidad relativamente alta de las partículas de material plástico. Por lo anterior, la transferencia de tensión desde la matriz de cemento a las partículas de plástico, que tienen un módulo de elasticidad bajo, da como resultado una deformación. Los resultados encontrados permiten afirmar que los factores responsables de la disminución de la resistencia a la compresión se deben a la baja fuerza de unión entre la superficie de los desechos plásticos y la pasta de cemento, y a la naturaleza hidrófoba de los desechos plásticos, que pueden inhibir la reacción de hidratación del cemento al restringir el movimiento del agua.

De los resultados de la **figura 5**, se observa claramente que la mezcla de concreto preparado con 1.7 % de plástico granulado presentan resistencia a la compresión de 21.6 MPa, cumpliendo con los requisitos de resistencia establecida (21.5 MPa) para su uso potencial en aplicaciones estructurales donde

se requiere densidad media y fuerza moderada. A diferencia de los resultados de Saikia et al. (2012), quienes emplearon gránulos con diferentes formas esféricas y cilíndricas, producidos a partir de residuos de PET, en este trabajo se trabaja exclusivamente con gránulos de una sola forma geométrica, lo cual permite asociar la diferencia en las propiedades mecánicas al porcentaje de reemplazo y no a la forma del material granulado.

De igual forma, las propiedades mecánicas de los concretos preparados con plástico granulado presentan resistencia moderada con potencial uso en losas y estructuras hidráulicas. Esto permite que las empresas locales dedicadas a preparar plásticos granulados amplíen su oferta comercial. Sin embargo, se necesita profundizar la investigación para evaluar los costos y las emisiones de dióxido de carbono que ocurren durante el proceso de granulación y su implicación en la comercialización del producto final.

CONCLUSIONES

Se elaboraron mezclas y especímenes de concreto tradicional y con incorporaciones de residuos de PET de alta densidad, triturado (sin tratamiento térmico) y granulado (con tratamiento térmico) como reemplazo del 1.7 %, 3.4 % y 5 % de los agregados finos. Los resultados experimentales evidenciaron que el asentamiento disminuye cuando se incorporan los residuos de PET triturados y aumenta cuando el residuo está granulado, comportamiento atribuido a la geometría de los distintos sustitutos.

Asimismo, con ambos materiales se observó una disminución en la densidad inversa al aumento en el contenido de residuos plásticos. Los resultados experimentales evidenciaron que un reemplazo de 1.7 % de los agregados finos por material granulado, mostró la mejor resistencia a la compresión (21.5 MPa), equivalente a un 96 % del material tradicional. Los hallazgos experimentales permitieron determinar que el plástico granulado afecta de manera positiva las propiedades de los concretos modificados.

La mejora en la resistencia a la compresión es una estrategia prometedora para la elaboración de concretos con resistencia similar al material tradicional, al tiempo que aborda el desafío de la gestión y aprovechamiento de residuos plásticos, especialmente en empresas locales que se dedican a la producción de concreto. Esto no sólo podría conducir a un impacto positivo en el ambiente, sino que también podría contribuir al desarrollo sostenible al generar nuevas

oportunidades de negocio para el sector de la gestión de residuos y alentar la implementación de prácticas más ecológicas en la industria del concreto.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad Cooperativa de Colombia por el apoyo financiero a través del proyecto INV2731. Se agradece a la empresa Fundación Socya por el uso del molino para preparar el material no granulado (triturado), y a la empresa Químicos SAS, por el material granulado suministrado. De la misma manera se extienden los agradecimientos a la empresa FC y FC constructora SAS por proporcionar los materiales para la elaboración de las mezclas.

REFERENCIAS

- Akçaözoglu S., Atiş C. D. y Akçaözoglu K. (2010). An investigation on the use of shredded waste PET bottles as aggregate in lightweight concrete. *Waste Management* 30 (2), 285-290. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.09.033>
- Almohana A. I., Abdulwahid M. Y., Galobardes I., Mush-taq J. y Almojil S. F. (2022). Producing sustainable concrete with plastic waste: A review. *Environmental Challenges* 9, 100626. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2022.100626>
- Alqahtani F. K., Ghataora G., Khan M. I. y Dirar S. (2017). Novel lightweight concrete containing manufactured plastic aggregate. *Construction and Building Materials* 148, 386-397. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.011>
- Alqahtani F. K. y Zafar I. (2021). Plastic-based sustainable synthetic aggregate in green lightweight concrete – A review. *Construction and Building Materials* 292, 123321. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123321>
- ACI 211 (2002). ACI 211.1-91. Standard practice for selecting proportions for normal, heavyweight and mass concrete. American Society for Testing and Materials. West Conshohocken, EUA, 5 pp.
- ASTM C29 (2016). ASTM C29/C29M-07. Standard Test Method for Bulk Density (Unit Weight) and Voids in Aggregate. American Society for Testing and Materials. West Conshohocken, EUA, 4 pp.
- ASTM C31 (2012). ASTM C31/C31M-19. Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Field. American Society for Testing and Materials. West Conshohocken, EUA, 5 pp.
- ASTM C39 (2003). ASTM C39/C39M-21. Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. American Society for Testing and Materials. West Conshohocken, EUA, 4 pp.
- ASTM C127 (2015). ASTM C127-15. Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate. American Society for Testing and Materials. West Conshohocken, EUA, 6 pp.
- ASTM C136 (2014). ASTM C136-06. Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates. American Society for Testing and Materials. West Conshohocken, EUA, 6 pp.
- ASTM C143 (2015). ASTM C143/C143M-12. Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete. American Society for Testing and Materials. West Conshohocken, EUA, 3 pp.
- ASTM C188 (2017). ASTM C188-17. Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement. American Society for Testing and Materials. West Conshohocken, EUA, 2 pp.
- ASTM C192 (2016). ASTM C192/C192M-15. Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory. American Society for Testing and Materials. West Conshohocken, EUA, 2 pp.
- Bab D. S., Ganesh B. K. y Wee T. H. (2005). Properties of lightweight expanded polystyrene aggregate concretes containing fly ash. *Cement and Concrete Research* 35 (6), 1218-1223. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.11.015>
- Basha S. I., Ali, M. R., Al-Dulaijan S. U. y Maslehdin M. (2020). Mechanical and thermal properties of lightweight recycled plastic aggregate concrete. *Journal of Building Engineering* 32, 101710. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101710>
- Celik G., Kennedy R. M., Hackle R. A., Ferrandon M., Tennakoon A., Patnaik S., Lapointe A. M., Ammal S. C., Heyden A., Perras F. A., Pruski M., Scott S. L., Poeppelmeier K. R., Sadow A. D. y Delferro M. (2019). Upcycling single-use polyethylene into high-quality liquid products. *ACS Central Science* 5 (11), 1795-1803. <https://doi.org/10.1021/acscentsci.9b00722>
- Choi Y. W., Moo D. J., Chung J. S. y Cho S. K. (2005). Effects of waste PET bottles aggregate on the properties of concrete. *Cement and Concrete Research* 35 (4), 776-781. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.05.014>
- Chu J., Cai Y., Li C., Wang X., Liu Q. y He M. (2021). Dynamic flows of polyethylene terephthalate (PET) plastic in China. *Waste Management* 124, 273-282. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.01.035>
- Dai L., Zhou N., L. Y., Cheng Y., Wang Y., Liu Y., Cobb K., Chen P., Lei H. y Ruan R. (2022). Pyrolysis technology

- for plastic waste recycling: A state-of-the-art review. *Progress in Energy and Combustion Science* 93, 101021. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2022.101021>
- 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>
- Ersan M. y Dogan H. (2021). Development of new adsorbents via microwave treatment magnetic PET synthesis from waste PET and investigation of TC removal. *Colloid and Interface Science Communications* 42, 100416. <https://doi.org/10.1016/j.colcom.2021.100416>
- Frigione M. (2010). Recycling of PET bottles as fine aggregate in concrete. *Waste Management* 30 (6), 1101-1106. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.01.030>
- Geyer R., Jambeck J. R. y Law K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made - Supplementary Information. *Science Advances* 3 (7), 19-24. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>
- Girija B. G., Sailaja R. R. N. y Madras G. (2005). Thermal degradation and mechanical properties of PET blends. *Polymer Degradation and Stability* 90, 147-153. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2005.03.003>
- Gu L. y Ozbakkaloglu T. (2016). Use of recycled plastics in concrete: A critical review. *Waste Management* 51, 19-42. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.03.005>
- Hannawi K., Kamali-Bernard S. y Prince W. (2010). Physical and mechanical properties of mortars containing PET and PC waste aggregates. *Waste Management* 30 (11), 2312-2320. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.03.028>
- Jansen D. C., Kiggins M. L., Swan C. W., Malloy R. A., Kashi M. G., Chan R. A., Javdekar C., Siegal C. y Weingram J. (2001). Lightweight fly ash-plastic aggregates in concrete. *Transportation Research Record* 1775, 44-52. <https://doi.org/10.3141/1775-07>
- Jiang J., Shi K., Zhang X., Yu K., Zhang H., He J., Ju Y. y Liu J. (2022). From plastic waste to wealth using chemical recycling: A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 10 (1), 106867. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106867>
- Karthika R. B., Vidyapriya V., Sri K. V. N., Beaula K. M. G., Harini R. y Sriram M. (2021). Experimental study on lightweight concrete using pumice aggregate. *Materials Today: Proceedings* 43, 1606-1613. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.762>
- Kim S. B., Yi N. H., Kim H. Y., Kim J. H. 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>
- Kumar V. K., Priya A. K., Manikandan G., Naveen A. S., Nitishkumar B. y Pradeep P. (2020). Review of materials used in light weight concrete. *Materials Today: Proceedings* 37 (2), 3538-3539. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.425>
- Kumar V. G., Karthik M. y Keshava M. (2020). Production of recycled plastic coarse aggregates and its utilization in concrete. *International Journal of Emerging Trends in Engineering Research* 8 (8), 4118-4122 <https://doi.org/10.30534/ijeter/2020/14882020>
- Lee H. L., Chiu C. W. y Lee T. (2021). Engineering terephthalic acid product from recycling of PET bottles waste for downstream operations. *Chemical Engineering Journal Advances* 5, 100079. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.100079>
- Marzouk O. Y., Dheilly R. M. y Queneudec M. (2007). Valorization of post-consumer waste plastic in cementitious concrete composites. *Waste Management* 27 (2), 310-318. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2006.03.012>
- Mohammed A. A. y Mohammed I. I. (2021). Effect of fiber parameters on the strength properties of concrete reinforced with PET waste fibers. *Iranian Journal of Science and Technology - Transactions of Civil Engineering* 45 (3), 1493-1509. <https://doi.org/10.1007/s40996-021-00663-2>
- Naderi V., Fouroghi-asl A., Nourani V. y Ma H. (2018). On the pore structures of lightweight self-compacting concrete containing silica fume. *Construction and Building Materials*, 193, 557-564. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.080>
- Putra P. H. M., Rozali S., Patah M. F. A. y Idris A. (2022). A review of microwave pyrolysis as a sustainable plastic waste management technique. *Journal of Environmental Management* 303, 114240. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114240>
- Rahmani E., Dehestani M., Beygi M. H., Allahyari H. y Nikbin I. M. (2013). On the mechanical properties of concrete containing waste PET particles. *Construction and Building Materials* 47, 1302-1308. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.06.041>
- Ren Y., Zhang Z. y Huang M. (2022). A review on settlement models of municipal solid waste landfills. *Waste Management* 149, 79-95. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.06.019>
- Rorrer N. A., Carpenter A., Biddy M. J., Nicholas J., Beckham G. T., Rorrer N. A., Nicholson S., Carpenter A., Biddy M. J. y Grundl N. J. (2019). Combining reclaimed PET with bio-based monomers enables plastics upcycling. *Joule* 3 (4), 1006-1027. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2019.01.018>
- Saikia N. y Brito J. D. (2014). Mechanical properties and abrasion behaviour of concrete containing shredded PET bottle waste as a partial substitution of

- natural aggregate. *Construction and Building Materials* 52, 236-244. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.049>
- Saikia N. y De Brito J. (2012). Use of plastic waste as aggregate in cement mortar and concrete preparation: A review. *Construction and Building Materials* 34, 385-401. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.066>
- Shams M., Alam I. y Mahbub M. S. (2021). Plastic pollution during COVID-19: Plastic waste directives and its long-term impact on the environment. *Environmental Advances* 5, 100119. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2021.100119>
- Sivakrishna A., Adesina A., Awoyera P. O. y Kumar K. R. (2019). Green concrete: A review of recent developments. *Materials Today: Proceedings* 27, 54-58. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.08.202>
- Singh N., Hui D., Singh R., Ahuja I. P. S., Feo L. y Fraternali F. (2017). Recycling of plastic solid waste: A state of art review and future applications. *Composites Part B: Engineering* 115, 409-422. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.09.013>
- Wang Y., Joong D., Jic Y. y Lachemi M. (2009). Characteristics of mortar and concrete containing fine aggregate manufactured from recycled waste polyethylene terephthalate bottles. *Construction and Building Materials* 23 (8), 2829-2835. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.02.036>
- Wang Y., Joong D., Jic Y. y Lachemi M. (2009). Characteristics of mortar and concrete containing fine aggregate manufactured from recycled waste polyethylene terephthalate bottles. *Construction and Building Materials* 23 (8), 2829-2835. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.02.036>
- Xayachak T., Haque N., Parthasarathy R., King S., Emami N., Lau D. y Pramanik B. K. (2022). Pyrolysis for plastic waste management: An engineering perspective. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 10 (6), 108865. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.108865>
- Yang Z., Lü F. y Wang W. (2021). Is incineration the terminator of plastics and microplastics? *Journal of Hazardous Materials* 401, 123429. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123429>
- Záleská M., Pavlíková M., Pokorný J., Jankovský O., Pavlík Z. y Černý R. (2018). Structural, mechanical and hygrothermal properties of lightweight concrete based on the application of waste plastics. *Construction and Building Materials* 180, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.250>
- Zhao X., Korey M., Li K., Copenhaver K., Tekinalp H., Celik S., Kalaitzidou K., Ruan R., Ragauskas A. J. y Ozcan S. (2022). Plastic waste upcycling toward a circular economy. *Chemical Engineering Journal* 428, 131928. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.131928>