

# Propiedades mecánicas y térmicas de hormigones modificados con residuos plásticos triturados y pelletizados

## Mechanical and thermal properties of concrete containing shredded and pelletized plastic wastes

Victor Manuel Blanchar-Amaya<sup>1</sup> ; Everyn Marcela Villalba-Manjarres<sup>1</sup> ; Sergio Andrés Monsalve-Romero<sup>1</sup> ; Oscar Felipe Arbeláez-Pérez<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidad Cooperativa de Colombia, Bogotá, Colombia. victor.blanchar@campusucc.edu.co; everyn.villalbam@campusucc.edu.co; Colombia.sergio.monsalver@campusucc.edu.co; oscar.arbelaez@campusucc.edu.co

Fecha de recepción: 26 de marzo de 2022.

Fecha de aceptación: 11 de mayo de 2022

**Resumen:** El carácter no biodegradable de los residuos plásticos tiene un efecto negativo sobre el medio ambiente. La valorización del plástico en la producción de hormigón con menor conductividad térmica puede contribuir a la disminución de la energía consumida para mantener el confort térmico al interior de los edificios. El presente estudio reporta la preparación de mezclas y cilindros de hormigón con residuos plásticos triturados y pelletizados como reemplazo (1.7%, 3.4% y 5%) de los agregados finos. Se evaluó la densidad, la resistencia a compresión y la conductividad térmica. Los resultados evidenciaron una disminución en la densidad y la conductividad térmica con el aumento del contenido de desechos plásticos triturados y pelletizados. Asimismo, los residuos plásticos triturados tienen un efecto negativo al disminuir la resistencia. El hormigón con 3,4% de residuos plásticos pelletizados presenta la mayor resistencia. La adición de plásticos pelletizados mejora las propiedades mecánicas y térmicas del hormigón modificado.

**Palabras clave:** conductividad térmica; plástico pelletizado; plástico triturado; propiedades térmicas; tereftalato de polietileno.

**Abstract:** The non-biodegradable character of plastic wastes has a negative effect on the environment. The valorization of plastic in the production of concrete with lower thermal conductivity may contribute to decreasing

the energy consumed to maintain indoor thermal comfort in buildings. The present study reports the preparation of mixes and cylindrical specimens of concrete with shredded and pelletized plastic wastes as replacements (1.7%, 3.4%, and 5%) for fine aggregates. Density, compressive strength, and thermal conductivity were measured. The experimental results demonstrated a decrease in density and thermal conductivity with increasing quantity of shredded and pelletized plastic wastes. Additionally, shredded plastic wastes have a negative effect by decreasing compressive strength. Concrete with 3.4% pelletized plastic presents the highest compressive strength. The incorporation of pelletized plastic improves the mechanical and thermal properties of modified concrete.

**Keywords:** pelletized plastic; polyethylene terephthalate; shredded plastic; thermal conductivity; thermal properties

### 1. INTRODUCCIÓN

El hormigón (mezcla heterogénea de cemento, agregados y agua) ha demostrado ser el material de construcción dominante en el mundo, en gran parte debido a su elevada resistencia a la compresión, su bajo costo de elaboración, su elevada resistencia al fuego y su prologada durabilidad [1]. Para el 2021 se reportó un consumo de 10 mil millones de toneladas anuales de hormigón y se espera que con el

crecimiento demográfico y la tasa de urbanización actual, su consumo aumente hasta alcanzar 18 mil millones de toneladas anuales para el 2050 [2].

Uno de los requisitos vitales del hormigón es la provisión del confort térmico y la reducción de la demanda energética de las edificaciones [3]. La atmósfera dentro de una edificación está determinada por diferentes factores, tales como el calor, la humedad, el viento circulante y el entorno circundante, entre otros [4]. El aumento en el consumo del aire acondicionado, en más del 20% entre 2010 y 2017, para satisfacer las necesidades de calefacción y enfriamiento de espacios, representa una tercera parte del consumo total de energía y alrededor del 39% de las emisiones directas e indirectas de dióxido de carbono, por tanto, se requieren estrategias que mejoren las propiedades térmicas del hormigón con el propósito de reducir el consumo energético de las edificaciones [5].

El conocimiento de las propiedades térmicas de los componentes de una estructura es vital en la evaluación de su eficiencia térmica. La conductividad térmica, la difusividad térmica, la resistividad térmica y el calor específico son los parámetros termo físicos utilizados para evaluar el comportamiento térmico del hormigón [6]. La transferencia de calor y el consumo de energía en los edificios están limitados por el hormigón de baja conductividad térmica, propiedad que depende principalmente de la densidad y del contenido de humedad del hormigón, así como del tipo, la forma y la cantidad de los agregados [7], [8].

La fabricación del hormigón requiere una gran cantidad de agregados, los cuales constituyen alrededor del 75% del volumen total [1]. El proceso de producción de agregados es muy intensivo en consumo energético y su uso extensivo está asociado con un agotamiento continuo de las materias primas disponibles de forma natural. Además, el uso de agregados naturales generalmente requiere operaciones intensivas en capital que incluyen: extracción, desplome, separación y transporte, las cuales influyen fuertemente en el costo total de producción del hormigón [2].

Por otro lado, anualmente se genera un gran volumen de residuos que causan una verdadera preocupación ambiental, especialmente para los residuos que requieren procedimientos específicos para su manejo y eliminación [9]. Debido al bajo costo de producción y las aplicaciones versátiles de los productos a base de plástico, en la industria alimentaria, la confección, la vivienda y el transporte, la producción anual mundial de plástico fue de 368 millones de toneladas en el 2019 [10]. En contraste con la enorme producción, solo el 10% del total de residuos plásticos se ha reciclado [11], por tanto, se requieren estrategias de valorización de residuos plásticos que permitan disminuir la contaminación ambiental y la proporción de espacios utilizados para su vertimiento.

Diferentes estudios informan de la utilización de residuos plásticos triturados como sustitutos de los agregados [12], [13]. La incorporación de materiales de baja conductividad térmica como el poliestireno expandido, el tereftalato de polietileno (comúnmente conocido como PET), y el polipropileno, entre

otros, reducen la conductividad térmica del hormigón [14], [15]. Sayadi et al [16] reportaron que en el hormigón preparado con poliestireno expandido, un aumento del contenido de poliestireno expandido genera una reducción en la conductividad térmica, la resistencia al fuego y la resistencia a la compresión. Xu et al [17] informaron que el reemplazo del 10%, 20%, 30% y 40% de los agregados por poliestireno expandido reduce la conductividad térmica y la densidad del hormigón a medida que aumenta el porcentaje de reemplazo, en línea con los resultados de Demirboga et al [18], quienes demostraron que la conductividad térmica y la densidad del hormigón preparado con reemplazos del 25%, 50%, 75% y 100% del agregado natural por residuos de poliestireno disminuyen con la incorporación de poliestireno expandido, reportando la máxima reducción en la conductividad térmica para un reemplazo del 100% de los agregados. Igualmente, Dixit et al [19] dieron cuenta de una relación inversamente proporcional entre el contenido de poliestireno y la densidad, la resistencia a la compresión y la conductividad térmica del hormigón preparado con poliestireno expandido en reemplazos del 10%, 20%, 30%, 40%, 50% y 60% de los agregados finos. Inayath et al [20] exploraron las propiedades de hormigones preparados con reemplazos del 25%, 50%, 75% y 100% de los agregados por PET triturado, encontrando una disminución en la densidad del hormigón, con el aumento en el contenido de residuos plásticos, comportamiento asociado con la baja densidad de los residuos en comparación con la de los agregados naturales. De la misma manera, los autores observaron una disminución de la resistencia a la compresión con el aumento en la cantidad de residuos plásticos, tendencia atribuida a la baja resistencia de los residuos en comparación con los agregados, la conductividad térmica presentó la misma tendencia que la densidad y la resistencia a la compresión, menor a mayor contenido de residuos plásticos, debido a la menor conductividad térmica de los plásticos. Belmokaddem et al [21] notificaron que la incorporación de residuos plásticos como sustitutos de los agregados, tiene un efecto negativo en la resistencia a la compresión, siendo menor a mayor contenido de plástico, sin embargo, se informó de un efecto positivo en la densidad y la conductividad térmica, las cuales disminuyeron con el aumento en el contenido de residuos plásticos, resultados que estuvieron en concordancia con los resultados de Basha et al [20], quienes reportaron que en la preparación de hormigones modificados con residuos plásticos triturados en reemplazo del 25%, 50%, 75% y 100% de los agregados finos, la conductividad térmica disminuye con el aumento del contenido de plástico reciclado, fenómeno que ha sido atribuido con la baja conductividad térmica de los residuos de plástico.

Los reportes de la literatura sobre hormigones preparados con diferentes residuos plásticos muestran que la densidad, la resistencia a la compresión y la conductividad térmica disminuyen con el incremento en el contenido de residuos, de hecho, en la mayoría de los reportes, la resistencia a la compresión está por debajo de la requerida para su uso con propósitos estructurales, esta tendencia es producto de la forma de incorporación de los residuos en las mezclas de hormigón, la cual se ha hecho en la mayoría de los casos, después de clasificarlos, limpiarlos y triturarlos, sin etapas térmicas o químicas previas que modifiquen sus propiedades físicas o mecánicas.

Se ha reportado que el pretratamiento térmico de los residuos plásticos mejora la resistencia a la compresión de los hormigones. Venitez et al [22] reportaron que el proceso previo de pelletización de los residuos plásticos mejora la resistencia a la compresión de los hormigones modificados, alcanzado el 90.5% de la resistencia del hormigón tradicional para un reemplazo del 7.5% de los finos. De la misma manera, Alqahtani et al [23] reportaron la preparación de hormigones modificados a partir de residuos plásticos procesados como sustitutos del 25%, 50%, 75% y 100% de los agregados, encontrando que para un reemplazo del 25%, la resistencia a la compresión alcanzó el 85% de la resistencia del hormigón tradicional, mejorando significativamente en relación con los reportes previos de la literatura, donde se ha informado que alcanza solo el 59% del tradicional para el mismo porcentaje de reemplazo [20]. Asimismo, Kangavar et al [24] reportaron que los hormigones preparados con residuos de PET procesado como sustitutos del 10%, 30% y 50% de los agregados finos, mostraron una mejora del 9% para el hormigón con un 10% de reemplazo de gránulos de PET en relación con la muestra de control, mientras que la resistencia a la compresión de los especímenes con reemplazo del 30% es cercana a la del hormigón de referencia. Sin embargo, se notó que hubo una reducción significativa del 26% para el hormigón con 50% de reemplazo de gránulos de PET en relación con el hormigón de referencia.

La literatura da cuenta del efecto positivo que tiene el proceso de pelletización de los residuos de plástico en la resistencia a la compresión, sin embargo, no se encuentran muchos reportes que informen sobre la influencia de este tipo de materiales en las propiedades térmicas del hormigón modificado, por lo cual, abordar esta temática permitiría sesgar una brecha del conocimiento. En este trabajo se presenta el estudio comparativo de la densidad, la resistencia a la compresión y la conductividad térmica del hormigón preparado con reemplazos del 1.7%, 3.4% y 5% de los agregados finos con plásticos triturados y pelletizados. Se espera que este estudio permita determinar las diferencias en las propiedades del hormigón elaborado con residuos plásticos, en aras de producir hormigones con características estructurales.

## 2. METODOLOGÍA

### 2.1 Caracterización de los materiales precursores

La caracterización de los materiales precursores se presenta en la tabla I.

### 2.2 Diseño de las mezclas de hormigón

El hormigón tradicional se diseñó como lo describe la metodología del instituto americano de hormigón ACI 211.18, empleando cemento argos de uso general (densidad de 3045 Kg/m<sup>3</sup>). La mezcla se diseñó con una relación agua cemento de 0.6, un asentamiento de 0.1 m y una resistencia a la compresión de 21 MPa. A partir de la mezcla de hormigón tradicional se diseñaron tres mezclas de hormigón modificado,

con reemplazos del 1.7%, 3.4% y 5% de los agregados finos por residuos de plástico triturado y pelletizado. Las masas de cada uno de los materiales para preparar 1 m<sup>3</sup> de hormigón se muestran en la tabla II.

Tabla I.  
CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES PRECURSORES

Característica	Agregados finos	Agregados gruesos
Masa unitaria suelta (Kg/m <sup>3</sup> )	1420	1650
Masa unitaria compacta (Kg/m <sup>3</sup> )	1600	1780
Densidad aparente (Kg/m <sup>3</sup> )	2430	2310
Absorción (%)	1.75	3.73
Tamaño máximo (mm)	n. a	25
Tamaño máximo nominal**	n. a	19*
Módulo de finura	3.77	2.54

n. a: no aplica.

Fuente: Los autores.

Tabla II.  
Kg DE MATERIAL POR m3 DE HORMIGÓN

% reemplazo	gruesos	finos	Cemento	Plástico
0	404	1209	377	0
1.7	404	1188	377	20.5
3.4	404	1168	377	41.1
5.0	404	1148	377	60.5

Fuente: Los autores.

Los residuos plásticos triturados y pelletizados se muestran en la Fig. 1. El material pelletizado fue suministrado por la empresa Químicos plásticos. Los plásticos triturados fueron recolectados a partir de botellas de PET y luego se trituraron en un molino de cuchillas. El material triturado se clasificó por análisis granulométrico utilizando una tamizadora eléctrica Tyler Rx-29 y para la preparación de las mezclas se utilizó el material retenido en los tamices # 4, # 8, # 16 y # 30, donde se encontraba alrededor del 95% del material.

Fig. 1 (A) RESIDUOS PLÁSTICOS TRITURADOS Y (B) RESIDUOS PELLETTIZADOS



Fuente: Los autores.

### 2.3 Elaboración de las mezclas y cilindros de hormigón

Las mezclas de hormigón se prepararon acorde a la normatividad técnica colombiana NTC 550 [25]. La elaboración de las mezclas comenzó humedeciendo por 24 horas el agregado grueso requerido, el cual se mezcló con el 75% del agua de diseño, en una concretadora durante 4 minutos. Posterior-

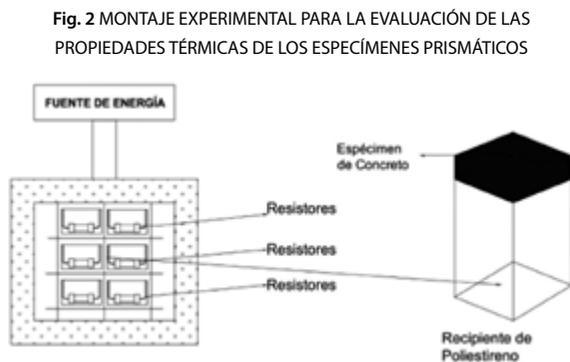
mente, se incorporó el cemento, los agregados finos, el agua restante y los residuos plásticos, los cuales se mezclaron por 4 minutos más. Por cada mezcla de hormigón se prepararon 3 especímenes cilíndricos de 0.15 m de diámetro por 0.3 m de altura, y 3 especímenes prismáticos de 0.25m x 0.25m, con un espesor de 0.03 m. Pasadas 24 horas de elaborados los especímenes se desencofraron y se sumergieron completamente en agua por 28 días.

#### 2.4 Evaluación de las propiedades mecánicas

Transcurridos 28 días, se calculó la densidad de los especímenes en estado endurecido, después de retirarlos del recipiente de fraguado y secarlos hasta condiciones de saturados superficialmente secos. Se empleó un equipo de compresión simple pilot que operó a una velocidad de carga de 0.5 KN/s.

#### 2.5 Evaluación de las propiedades térmicas

La estimación de la conductividad térmica de los especímenes prismáticos de hormigón se llevó a cabo en un recipiente cerrado de poliestireno sin tapa, tal como se muestra en la Fig. 2.



Fuente: Los autores.

La superficie interna del recipiente se recubrió con material reflexivo de aluminio para evitar la pérdida de calor, el fondo del recipiente tenía un circuito de resistencias, el cual se conectó a una fuente de 5V y una corriente de 3A. Para asegurar que el espécimen prismático de hormigón no estuviera en contacto con el circuito, esta reposó sobre una estructura de madera que actuó como soporte. La temperatura en la superficie interna y externa del espécimen prismático de hormigón se midió utilizando dos termocuplas conectadas en el centro del espécimen prismático con un multímetro digital unit t-ut33c.

La ecuación (1) se empleó para calcular la conductividad térmica de los especímenes prismáticos de hormigón.

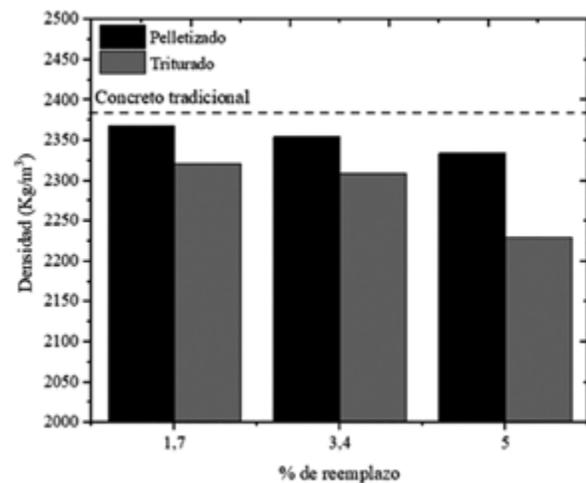
$$k = \frac{VI \epsilon}{A\Delta T} \quad (1)$$

Donde  $k$  representa la conductividad térmica,  $V$  representa el voltaje de la fuente ( $V$ ),  $I$  denota la corriente utilizada ( $A$ ),  $\epsilon$  representa el espesor de la placa,  $A$  denota el área de la superficie transversal ( $m^2$ ) y  $\Delta T$  representa el gradiente de temperatura entre ambas caras de la placa ( $K$ ). Para observar su comportamiento térmico se tomaron datos de voltaje, corriente, resistencia y temperatura externa e interna de la placa, el tiempo y el cálculo de la conductividad se llevaron a cabo cuando el sistema alcanzó un estado estable.

### 3. RESULTADOS

La Fig. 3 muestra los resultados de la densidad a los 28 días de los especímenes de hormigón.

Fig. 3 DENSIDAD DE LOS ESPÉCIMENES DE HORMIGÓN



Fuente: Los autores.

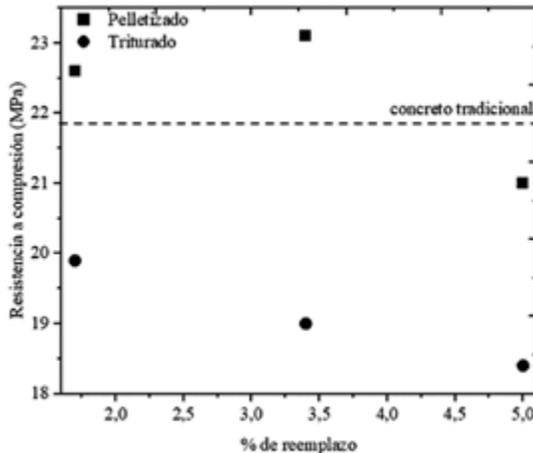
De los resultados de la Fig. 3 se puede notar claramente que la incorporación de residuos plásticos triturados o pelletizados disminuye la densidad del hormigón tradicional ( $2380 \text{ Kg/m}^3$ ). La menor densidad de los residuos plásticos triturados ( $306 \text{ kg/m}^3$ ) y pelletizados ( $609 \text{ kg/m}^3$ ), en comparación con los agregados finos ( $2430 \text{ kg/m}^3$ ), es la causa de la disminución de la densidad en estado endurecido del hormigón, en concordancia con los reportes previos de otros autores [26]. Asimismo, de la Fig. 3, se observa que el plástico triturado provoca una mayor disminución de la densidad del hormigón, que el material pelletizado, de hecho, para reemplazos del 1.7%, 3.4% y 5% de agregados finos por plástico triturado se encontraron disminuciones en la densidad del 2%, 5% y 8%, respectivamente, mientras que, para estos mismos porcentajes de reemplazo, las reducciones fueron del 1%, 2 y 4% para el material pelletizado. La menor sensibilidad en la densidad del hormigón preparado con plástico pelletizado puede estar relacionada con su similitud geométrica a los agregados finos, generando así un efecto de relleno en la matriz del hormigón.

Los resultados de la Fig. 3 sugieren que las mezclas de hormigón producidas, con residuos plásticos, podrían ser útiles en aplicaciones donde se requiere baja densidad. Este

resultado es importante, ya que el uso de un hormigón de menor densidad puede ayudar a reducir el tamaño del elemento y, en consecuencia, reducir el costo de los materiales, el manejo y el transporte y, en última instancia, el costo total.

Los resultados de la resistencia a la compresión se presentan en la Fig. 4.

Fig. 4. RESISTENCIA MECÁNICA DEL HORMIGÓN PREPARADO

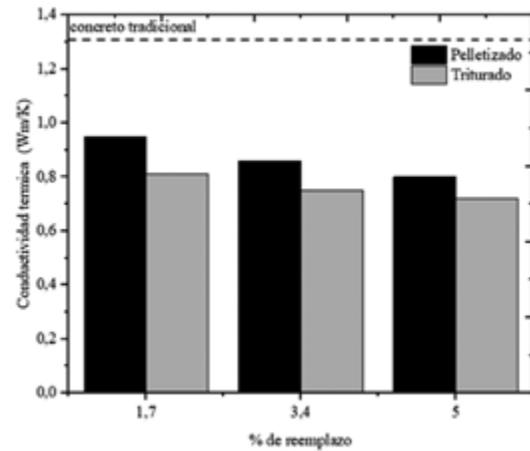


Fuente: Los autores.

De los resultados de la Fig. 4 se observa que los hormigones preparados con plástico triturado presentaron una resistencia a la compresión menor que el hormigón tradicional (21.8 MPa), siendo menor a mayor porcentaje de reemplazo. Para reemplazos del 1.7%, 3.4% y 5%, se observaron disminuciones del 8.7%, 12.6% y 15.6%, respectivamente. Los resultados encontrados están en línea con los reportes de la literatura, donde se ha informado que la disminución en la resistencia está relacionada con la menor resistencia mecánica, y el menor módulo de elasticidad de los residuos plásticos [27] bottles made of polyethylene terephthalate (PET), [28]. Además, su naturaleza hidrofóbica afecta su potencial para formar productos de hidratación en la interfase, disminuyendo su capacidad de unión con los demás componentes de la matriz de hormigón y, por tanto, la resistencia a la compresión del hormigón [29], [30]. A pesar de la disminución de la resistencia, esta no es relevante, estos hormigones se utilizan en aplicaciones estructurales donde se requiere resistencia moderada. Asimismo, en la Fig. 4 se aprecia que la resistencia a la compresión del hormigón preparado con residuos plásticos pelletizados, mostró un comportamiento diferente, aumentando 4% y 6% para porcentajes de reemplazo del 1.7% y del 3.4%, respectivamente, porcentaje a partir del cual disminuye hasta un 4% para un reemplazo del 5%. El aumento en la resistencia a la compresión puede estar relacionado con la mayor densidad de los plásticos pelletizados.

Los resultados de la conductividad térmica se presentan en la Fig. 5.

FIG. 5. CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DEL HORMIGÓN PREPARADO



Fuente: Los autores.

De acuerdo con los resultados de la Fig. 5, el concreto tradicional presentó una conductividad térmica de 1.31 W/mK en línea con los reportes previos de la literatura [20], [31], donde se ha informado una conductividad térmica de 1.23 W/mK y 1.7 W/mK en el concreto tradicional. En la Fig. 5 se puede apreciar que la conductividad térmica de los hormigones modificados, es influenciada por el porcentaje de reemplazo y por la forma del plástico. El hormigón preparado con reemplazos de 1.7%, 3.4% y 5% presentó disminuciones del 38%, 43% y 45% para el material triturado y disminuciones del 27%, 34% y 39% para el material pelletizado, respectivamente. La disminución en la conductividad térmica con el aumento en el contenido de residuos plásticos está en línea con los reportes de la literatura [32], donde tal tendencia ha sido relacionada por el hecho de que los agregados plásticos tienen una conductividad térmica más baja que la de los agregados convencionales, lo cual disminuye la conductividad térmica final del hormigón y mejora su poder aislante [33]. Asimismo, se observa que para un porcentaje de reemplazo del 3.4%, la conductividad térmica del hormigón preparado con plástico triturado (0.75 W/mK) fue menor que en el hormigón preparado con plástico pelletizado (0.86 W/mK), lo cual está relacionado con la estructura densa del plástico pelletizado que contribuyó a una mejor transferencia de calor a través de la matriz de hormigón, mientras que la inclusión de material triturado genera vacíos en la matriz, que mejora el aislamiento en el hormigón. Los resultados muestran que la incorporación de residuos plásticos permite producir hormigones con características estructurales (mayores a 17.5 MPa) y de baja resistencia térmica, que permitirían un ahorro energético efectivo.

#### 4. CONCLUSIONES

Este trabajo de investigación examinó el efecto de la incorporación de residuos plásticos triturados y pelletizados como sustitutos del 1.7%, 3.4% y 5% de los agregados finos en la densidad, la resistencia a la compresión y la conductividad térmica. De este trabajo de investigación se pueden extraer las siguientes conclusiones, con base en los hallazgos experimentales:

La incorporación de residuos plásticos en el hormigón como reemplazo parcial de los agregados finos induce a una reducción en la densidad del hormigón endurecido conforme aumenta el porcentaje de reemplazo. Se encontró una mayor disminución en la densidad para el material triturado en relación con el material pelletizado, tendencia relacionada con la mayor densidad de este último.

Hubo una disminución en la resistencia a la compresión del hormigón, a medida que aumentaba el contenido de residuos plásticos triturados. Esto se atribuyó a la débil unión entre la matriz cementosa y los residuos plásticos. Mientras que para el hormigón preparado con residuos plásticos pelletizados con niveles de reemplazo de 1.7% y 3.4% la resistencia a la compresión fue mayor que la mezcla de referencia. Siendo la mezcla de hormigón con un reemplazo de 3.4% la de mayor resistencia (6% mayor que el hormigón tradicional), tendencia relacionada con la similitud de estos materiales y los agregados finos, y la mayor densidad en relación con los residuos plásticos triturados.

El uso de agregados plásticos en el hormigón mejora su aislamiento térmico. La conductividad térmica más baja se detectó en hormigones preparados con residuos plásticos triturados. Esto se considera una solución valiosa para los problemas de balance energético en el sector de la construcción. De esta manera, la eficiencia térmica del edificio se podría mejorar significativamente.

Finalmente, los resultados obtenidos muestran la incorporación de residuos plásticos triturados o pelletizados, se percibe como una solución prometedora para reducir el impacto ambiental del plástico en términos de contaminación, consumo de energía y eliminación de residuos.

## 5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo financiero a la Universidad Cooperativa de Colombia a través del proyecto de investigación INV3167.

## 6. REFERENCIAS

- [1] Z. C. Steyn, A. J. Babafemi, H. Fataar, and R. Combrinck, Concrete containing waste recycled glass, plastic and rubber as sand replacement, *Construction and Building Materials*, vol. 269, pp. 121-242, 2021, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121242>
- [2] H. M. Hamada *et al.*, Sustainable use of palm oil fuel ash as a supplementary cementitious material: A comprehensive review, *Journal of Building Engineering*, vol. 40, pp. 102-286, 2021, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.job.2021.102286>
- [3] J. Chai and J. Fan, Advanced thermal regulating materials and systems for energy saving and thermal comfort in buildings, *Materials Today Energy*, vol. 24, pp. 100-925, 2022, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mtener.2021.100925>
- [4] G. Thakur, M. Asalam, and M. El Ganaoui, Energy efficient building envelope using waste PET in concrete, *MATEC Web of Conferences*, vol. 307, pp. 10-22, 2020, DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/202030701022>
- [5] P. Shafiqh, I. Asadi, and N. B. Mahyuddin, Concrete as a thermal mass material for building applications - A review, *Journal of Building Engineering*, vol. 19, pp. 14-25, 2018, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.job.2018.04.021>
- [6] A. Karaki, M. Mohammad, E. Masad, and M. Khraisheh, Case Studies in Thermal Engineering Theoretical and computational modeling of thermal properties of lightweight concrete, *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 28, pp. 101-683, 2021, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.job.2018.04.021>
- [7] Z. Misri, M. H. W. Ibrahim, A. S. M. A. Awal, M. S. M. Desa, and N. S. Ghadzali, Review on factors influencing thermal conductivity of concrete incorporating various type of waste materials, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 140 (1), pp. 012-141, 2018, DOI: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/140/1/012141#:~:text=10.1088/1755%2D1315/140/1/012141>
- [8] I. Asadi, P. Shafiqh, Z. F. Bin, A. Hassan, and N. B. Mahyuddin, Thermal conductivity of concrete- A review, vol. 20, pp. 81-93, *Journal of Building Engineering*, 2018, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.job.2018.07.002>
- [9] Z. Liu, X. Yuan, Y. Zhao, J. Wei, and H. Wang, Concrete waste-derived aggregate for concrete manufacture, *Journal of Cleaner Production*, vol. 338, pp. 130-637, 2022, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130637>
- [10] Association of plastic manufactures, Plastics - the Facts 2020, [online], available: <https://plasticseurope.org/knowledge-hub/plastics-the-facts-2020/>, [accessed: Feb. 17, 2022].
- [11] J. Huang, A. Veksha, W. Ping, A. Giannis, and G. Lisak, Chemical recycling of plastic waste for sustainable material management : A prospective review on catalysts and processes, *Renewable. Sustainable Energy Review*, vol. 154, pp. 111-866, 2022, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111866>
- [12] L. Gu and T. Ozbakkaloglu, Use of recycled plastics in concrete: A critical review, *Waste Management*, vol. 51, pp. 19-42, 2016, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.03.005>
- [13] C. N. Ngandu, Compressive strength prediction for glass aggregates incorporated concrete, using neural network and reviews, *Iteckne*, vol. 19 (2), pp. 61-68, 2022, DOI: <https://doi.org/10.15332/iteckne.v19i2.2769>
- [14] B. Abu-jdayil, A. Mourad, W. Hittini, M. Hassan, and S. Hameedi, Traditional, state-of-the-art and renewable thermal building insulation materials: An overview, *Construction and Building Materials*, vol. 214, pp. 709-735, 2019, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.102>
- [15] C. Xue, M. Yu, H. Xu, L. Xu, M. Saafi, and J. Ye, Experimental study on thermal performance of ultra-high performance concrete with coarse aggregates at high temperature, *Construction and Building Materials*, vol. 314, pp. 125-585, 2022, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125585>
- [16] A. A. Sayadi, J. V. Tapia, T. R. Neitzert, and G. C. Clifton, Effects of expanded polystyrene (EPS) particles on fire resistance , thermal conductivity and compressive strength of foamed concrete, *Construction and Building Materials*, vol. 112, pp. 716-724, 2016, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.218>
- [17] Y. Xu, L. Jiang, J. Liu, Y. Zhang, J. Xu, and G. He, Experimental study and modeling on effective thermal conductivity of EPS lightweight concrete, vol. 11 (2), pp. 1-13, 2016, DOI: <https://doi.org/10.1299/jtst.2016jtst0023>
- [18] R. Demirboga and A. Kan, Thermal conductivity and shrinkage properties of modified waste polystyrene aggregate concretes,

- Construction and Building Materials*, vol. 35, pp. 730-734, 2012, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.105>
- [19] A. Dixit, S. D. Pang, S. H. Kang, and J. Moon, Lightweight structural cement composites with expanded polystyrene (EPS) for enhanced thermal insulation, *Cement and Concrete Composites.*, vol. 102, pp. 185-197, 2019, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.04.023>
- [20] S. I. Basha, M. R. Ali, S. U. Al-Dulajjan, and M. Maslehuiddin, Mechanical and thermal properties of lightweight recycled plastic aggregate concrete, *Journal of Building Engineering.*, pp. 101-110, 2020, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101710>
- [21] M. Belmokaddem, A. Mahi, Y. Senhadji, and B. Y. Pekmezci, Mechanical and physical properties and morphology of concrete containing plastic waste as aggregate, *Construction and Building Materials*, vol. 257, pp. 119-559, 2020, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119559>
- [22] O. F. Arbeláez-Pérez, J. F. Venites-Mosquera, Y. M. Córdoba-Palacios, and K. P. Mena-Ramírez, Propiedades mecánicas de concretos modificados con plástico marino reciclado en reemplazo de los agregados finos, *Revista. Politécnica*, vol. 16 (31), pp. 77-84, 2020, DOI: <https://doi.org/10.33571/rpolitec.v16n31a6>
- [23] F. K. Alqahtani, G. Ghataora, M. I. Khan, and S. Dirar, Novel lightweight concrete containing manufactured plastic aggregate, *Journal of Building Engineering*, vol. 148, pp. 386-397, 2017, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.011>
- [24] M. E. Kangavar, W. Lokuge, A. Manalo, W. Karunasena, and M. Frigione, Investigation on the properties of concrete with recycled polyethylene terephthalate (PET) granules as fine aggregate replacement, *Case Studies in Construction Materials.*, vol. 16, pp. e00934, 2022, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e00934>
- [25] Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, NTC 550. *Elaboración y Curado de Especímenes de Concreto para Ensayos de Laboratorio*, [online], available: [https://www.academia.edu/38869298/NORMA\\_TECNICA\\_COLOMBIANA\\_NTC\\_550](https://www.academia.edu/38869298/NORMA_TECNICA_COLOMBIANA_NTC_550) [accessed: Dec. 15, 2021]
- [26] V. G. Ajey Kumar, M. Karthik, and M. Keshava, Production of recycled plastic coarse aggregates and its utilization in concrete, *International Journal of Emerging Trends in Engineering Research*, vol. 8 (8) pp. 4118-4122, 2020, DOI: <https://doi.org/10.30534/ijeter/2020/14882020>
- [27] O. Y. Marzouk, R. M. Dheilily, and M. Queneudec, Valorization of post-consumer waste plastic in cementitious concrete composites, *Waste Management*, vol. 27 (2), pp. 310-318, 2007, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2006.03.012>
- [28] L. Pezzi, P. De Luca, D. Vuono, F. Chiappetta, and A. Nastro, Concrete products with waste's plastic material (bottle, glass, plate), *Materials Science Forum*, vol. 516, pp. 1753-1758, 2006, DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.514-516.1753>
- [29] M. Gesoglu, E. Güneyisi, O. Hansu, S. Etlı, and M. Alhassan, Mechanical and fracture characteristics of self-compacting concretes containing different percentage of plastic waste powder, *Construction and Building Materials*, vol. 140, pp. 562-569, 2017, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.139>
- [30] X. Li, T. Ling, and K. Hung, Functions and impacts of plastic / rubber wastes as eco-friendly aggregate in concrete – A review, *Construction and Building Materials*, vol. 240, p. 117-869, 2020, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117869>
- [31] I. Rahmouni, G. Promis, A. R'mili, H. Beji, and O. Limam, Effect of carbonated aggregates on the mechanical properties and thermal conductivity of eco-concrete, *Construction and Building Materials*, vol. 197, pp. 241-250, 2019, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.210>
- [32] M. A. Al-osta, A. S. Al-tamimi, S. M. Al-tarbi, O. S. B. Al-amoudi, W. A. Al-awsh, and T. A. Saleh, Development of sustainable concrete using recycled high-density polyethylene and crumb tires : Mechanical and thermal properties, *Journal of Building Engineering*, vol. 45, pp. 103-399, 2022, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103399>
- [33] A. Boucedra, M. Bederina, and Y. Ghernouti, Study of the acoustical and thermo-mechanical properties of dune and river sand concretes containing recycled plastic aggregates, *Construction and Building Materials*, vol. 256, pp. 119-447, 2020, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119447>