



The influence of the incorporation of waste glass on the properties of concrete containing pelletized waste plastic

Efecto de la incorporación de residuos de vidrio en las propiedades del hormigón preparado con residuos plásticos pelletizados

Diego Alejandro Ruiz-Palencia¹, Liz Anyuli Cuervo-Berrio², Cristian Daniel Rodríguez-Rave³, Oscar Felipe Arbelaez- Perez⁴

¹Estudiante de Ingeniería civil, diego.ruizpa@campusucc.edu.co, <https://orcid.org/0000-0002-3717-3883>, Universidad Cooperativa de Colombia, Medellín, Colombia.

²Estudiante de Ingeniería civil, liz.cuervo@campusucc.edu.co, <https://orcid.org/0000-0002-0554-3333>, Universidad Cooperativa de Colombia, Medellín, Colombia.

³Estudiante de Ingeniería civil, cristian.rodriguezra@campusucc.edu.co, <https://orcid.org/0000-0003-1820-7002>, Universidad Cooperativa de Colombia, Medellín, Colombia.

⁴PhD en Ingeniería, oscar.arbelaez@campusucc.edu.co, <https://orcid.org/0000-0001-8592-5333>, Universidad Cooperativa de Colombia, Medellín, Colombia.⁵MSc. Agronegocios. sandra.montesino@unipaz.edu.co, <https://orcid.org/0000-0002-3437-6976>, Instituto Universitario de la Paz, Barrancabermeja, Colombia.

How to cite: D. A. Ruiz-Palencia, L. A. Cuervo-Berrio, C. D. Rodríguez-Rave, y O. F. Arbelaez- Perez, "Efecto de la incorporación de residuos de vidrio en las propiedades del hormigón preparado con residuos plásticos pelletizados", *Respuestas*, vol. 27, n.º 3, pp. 49-59, sep. 2022. <https://doi.org/10.22463/0122820X.3366>

Received on April 19, 2022 - Approved on August 30, 2022.

ABSTRACT

Keywords:

Pelletized plastic, Waste glass, Waste management, Recycled PET granules, Mechanical properties.

The plastic and glass residues are not biodegradable and they have a low recycling rate. They can be utilized as precursors in concrete preparation. This study investigates the effect of the incorporation of waste glass in the mechanical properties of concrete containing pelletized plastic as fine aggregates replacement. The concrete mixtures were designed and prepared with 20% replacement of fine aggregates. Different Plastic: Glass (1:0, 1:1, 1:2, 1:3) volume ratio were prepared. The results show that the slump increases when the content of glass increases. Additionally, the incorporation of glass did not have a profound implications on density. It also demonstrates that glass incorporation improves the compressive strength of concrete. The largest compressive strength was obtained over the 1:2 concrete mix. Concrete containing pelletized plastic and glass is a promising solution to solve of waste management.

RESUMEN

Palabras clave:

Plástico pelletizado, Residuos de vidrio, Gestión de residuos, Gránulos de PET reciclado, Propiedades mecánicas.

Los residuos de plástico y vidrio no son biodegradables y tienen baja tasa de reciclaje. Estos pueden utilizarse como precursores en la preparación del hormigón. Este estudio investiga el efecto de la incorporación de residuos de vidrio en las propiedades mecánicas del hormigón elaborado con plástico pelletizado como reemplazo de los agregados finos. Las mezclas de hormigón se fueron diseñaron con un 20% de reemplazo (volumen) de los agregados finos. Se prepararon relaciones en volumen Plástico: Vidrio (1:0, 1:1, 1:2, 1:3). Los resultados mostraron que el asentamiento aumenta con el aumento de vidrio. Adicionalmente, la incorporación de vidrio no afecta significativamente la densidad. Se encontró que la incorporación de vidrio mejora la resistencia a compresión del hormigón. La mayor resistencia a compresión se obtuvo para la mezcla de hormigón 1:2. El hormigón que contiene plástico pelletizado y vidrio es una solución prometedora para resolver los problemas de gestión de residuos.

Introducción

Los plásticos son materiales de densidad relativamente baja, resistentes a la corrosión, excelentes aislantes térmicos y eléctricos [1]. Los plásticos tienen una amplia gama de aplicaciones en el envasado de alimentos y bebidas, en el embalaje y transporte de productos, en la industria farmacéutica y de la construcción, entre otras [2]. Para el 2015, la generación de residuos plásticos fue de aproximadamente 6.300 millones de toneladas [3], de las cuales el 12 % se incineró, el 79 % se enterró y solo el 9 % se recicló [4]. Debido a sus largos períodos de degradación, la eliminación de residuos plásticos representa una amenaza para el océano, la atmósfera y el suelo [5]. Las actividades diarias de los individuos crean en

*Corresponding author.

E-mail Address: diego.ruizpa@campusucc.edu.co

(Diego Alejandro Ruiz Palencia)



Peer review is the responsibility of the Universidad Francisco de Paula Santander.

This is an article under the license CC BY-NC 4.0

promedio una huella de carbono anual de aproximadamente 7.1 toneladas de CO₂ equivalente per cápita, de los cuales 170 kg de CO₂ (1,3%), son atribuibles a los plásticos [6]. La huella de carbono del plástico es alrededor de 6 kg de CO₂ por kg de plástico producido. Si no se toman medidas, se prevé que la cantidad de residuos plásticos producidos a nivel mundial se triplique entre 2015 y 2060, a entre 155 y 265 millones de toneladas por año [7]. La eliminación de todo tipo de residuos plásticos constituye un verdadero desafío al que se enfrentan los responsables de las políticas ambientales en todo el mundo, ya que su acumulación conduce a la propagación de muchas enfermedades e incendios accidentales, así como a la contaminación del medio ambiente, la atmósfera y las aguas subterráneas [8].

La reutilización de residuos plásticos como agregados en la producción de hormigón puede contribuir a su eliminación, así como a la protección del medio ambiente [9]. El plástico se ha incorporado al hormigón principalmente como piezas fragmentadas de una fuente de plástico, principalmente como botellas de tereftalato de polietileno de alta y de baja densidad, o se ha utilizado como material de origen para fabricar agregados a base de plástico [10]. Los estudios reportan que las propiedades en estado fresco y endurecido, tales como el asentamiento, la densidad y la resistencia a la compresión del hormigón que contiene piezas fragmentadas de plástico mostraron una tendencia decreciente a medida que aumentaba el porcentaje de reemplazo [11], en los estudios reportados se ha dado especial importancia en la incorporación de plásticos reciclados o residuos tal como se reciben o triturados (procesamiento mecánico), sin embargo, pocos estudios se han centrado en la fabricación de agregados sintéticos utilizando los residuos plásticos reciclados. La preparación de piezas de plástico procesado de diferentes formas y tamaños ha empezado a recibir atención significativa en los últimos años. Venitez et al [12] informaron que la preparación de hormigones modificados con 2.5%, 5.0%, 7.5% y 10% de reemplazo de los agregados finos por polietileno tereftalato procesado térmicamente en forma de pellets, mejora ostensiblemente la resistencia a la compresión, alcanzado una resistencia del 90.5% de la resistencia del hormigón tradicional para un reemplazo del 7.5%. Asimismo, Alqahtani et al [13], reportaron la preparación de hormigones con reemplazos del 25%, 50%, 75% y 100% de los agregados finos por agregados artificiales formados por moldeamiento térmico por compresión de mezclas 30% de residuos plásticos reciclados y 70% de arenas de dunas rojas. Los autores reportaron una resistencia equivalente al 85% de la resistencia del hormigón tradicional, para un reemplazo del 25% de los agregados finos. Basha et al [14] reportaron la preparación de hormigones modificados con 25%, 50%, 75% y 100% de los agregados finos por residuos fundidos y triturados en forma de gránulos (pellets), los autores informaron de la disminución de la densidad y la resistencia a la compresión con el aumento en el contenido de plástico pelletizado, la tendencia mostrada en la densidad fue relacionada con la baja densidad del plástico pelletizado, en comparación con los agregados naturales, mientras que la disminución en la resistencia fue asociada con la baja resistencia de los plásticos pelletizados y con la débil zona de transición entre el plástico y el cemento. De manera similar, Kangavar et al [15], informaron de la preparación de hormigones modificados con 10%, 30% y 50% de los agregados finos por residuos plásticos pelletizados, los autores dieron cuenta de una disminución de la densidad con el incremento en el contenido de pellets de plástico. Además de esto, los autores informaron de una mejora del 9% en la resistencia a la compresión para un porcentaje de reemplazo del 10%, valor a partir del cual se encontró una disminución significativa, de hecho, se reportó una disminución del 26.3% para un reemplazo del 50% en relación con el hormigón de referencia. Como se puede observar, en los reportes de la literatura, la resistencia a la compresión mejora cuando los residuos plásticos son procesados térmicamente de forma previa a su incorporación en el hormigón, sin embargo, en general, la resistencia a la compresión no mejora ostensiblemente, con respecto a la resistencia del hormigón tradicional, por tanto, se requieren estudios adicionales que permitan mejorar la resistencia a la compresión a valores cercanos o superiores al tradicional.

El vidrio es un material ampliamente utilizado en la industria farmacéutica, la industria automotriz y en la industria de los electrodomésticos, la construcción y en la industria de envasado y transporte de alimentos y bebidas [16]. Los residuos de vidrio son una fuente importante de residuos sólidos urbanos y su cantidad ha aumentado gradualmente en los últimos años. Se estima que a 2025, la cantidad total de residuos sólidos alcanzará los 19 mil millones de toneladas por año y los residuos de vidrio usado representan el 7% de los residuos sólidos mundiales [17]. Los residuos de vidrio pueden utilizarse como material de origen y reciclarse en nuevos productos [18]. Sin embargo, a menudo, el vidrio reutilizado tiene impurezas o colores mezclados indeseables. Por lo tanto, la mayoría de los desechos de vidrio se envían a los vertederos, lo que genera problemas ambientales, ya que el vidrio no es biodegradable [19]. Diferentes estudios han demostrado que el uso de residuos de vidrio como componente del hormigón en forma de agregados podría generar un impacto económico y sostenible para la sociedad [20]. Tan et al [21], reportaron la preparación de hormigón modificado con 25%, 50%, 75% y 100% de los agregados finos por residuos de vidrio, los autores informaron que al día 28, los hormigones preparados con 25% de reemplazo de los agregados presentan una resistencia 4% mayor a la del hormigón tradicional. Asimismo, Ismail et al [22], reportaron que en los hormigones preparados con reemplazos del 5%, 10%, 15% y 20% de los agregados finos por residuos de vidrio, se encontró un aumento del 4.3% para un reemplazo del 20%, efecto asociado con las reacciones puzolánicas entre el vidrio y los componentes de la matriz de hormigón. Esta tendencia también fue reportada por Arivalagan et al [23] quienes informaron un máximo en la resistencia para un porcentaje de reemplazo del 20%, siendo un 15% mayor que la del hormigón tradicional.

Acorde al efecto que tiene la incorporación individual de residuos plásticos procesados en las propiedades mecánicas del hormigón, así como el efecto positivo que tiene la incorporación de residuos de vidrio en la preparación de hormigones modificados, en este trabajo se presentan los resultados del diseño y la preparación de mezclas y especímenes cilíndricos de hormigón con reemplazo del 20% en volumen de los agregados finos por residuos plásticos pelletizados. Se prepararon diferentes mezclas de hormigón en relaciones volumétricas de plástico: vidrio 1:0, 1:1, 1:2 y 1:3 (plástico + residuos de vidrio = 20% en volumen de reemplazo de los agregados finos). Por efecto comparativo se preparó el hormigón con 20% en volumen de los agregados plásticos triturados. La evaluación de las propiedades mecánicas incluyó la medida del asentamiento, la densidad, la resistencia a la compresión y el módulo de elasticidad. Se espera que la incorporación de residuos de vidrio permita mejorar las propiedades del hormigón preparado a partir de plástico pelletizado y potencializar su uso como hormigón liviano con resistencia moderada.

Materiales y Métodos

Caracterización de los materiales precursores

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

Tabla I. Caracterización de los materiales precursores

Característica	Cemento	Agregado fino	Agregado grueso
Masa Unitaria Suelta (kg/m ³)	1520	1420	1650
Masa Unitaria Compacta (kg/m ³)	1655	1648	1780
Gravedad Específica	3.00	2.43	2.31
Humedad (%)	N/A	9.81	062
Absorción (%)	N/A	1.45	1.29
Tamaño Máximo Nominal (mm)	N/A	9.50	19.00
Módulo de Finura	N/A	2.50	N/A

Los residuos de vidrio se caracterizaron mediante difracción de rayos X empleando un difractómetro Bruker AXS D8 Advance con radiación CuK α , el equipo operó a 40 kV y 20 mA, el análisis se realizó en un ángulo 2 θ de 5° a 70° en un tamaño de paso de 0.01°/s.

Diseño de las mezclas de hormigón

El hormigón tradicional se diseñó como lo describe la metodología del Instituto Americano de Concreto ACI 211.18, empleando cemento argos de uso general (densidad de 3045 kg/m³). La mezcla se diseñó con una relación agua cemento de 0.5, un asentamiento de 0.075 m y una resistencia a la compresión de 21 MPa. A partir de la mezcla de hormigón tradicional denotada como 0:0 se diseñaron cuatro mezclas de hormigón modificado. Con remplazo del 20% en volumen del agregado fino. Este volumen a su vez se distribuyó con las proporciones de 1:0, 1:1, 1:2 y 1:3 de PET y residuo de vidrio respectivamente, el volumen de cada uno de los materiales para preparar 1 m³ de hormigón se muestran en la *Tabla II*.

Tabla II. Diseño de Mezcla y Proporción de Volumétrica de Plástico:Vidrio

	Mezcla				
Material (m ³)	0:0	1:0	1:1	1:2	1:3
Agua	0.205	0.205	0.205	0.205	0.205
Agregado grueso	0.493	0.493	0.493	0.493	0.493
Agregado fino	0.165	0.132	0.132	0.132	0.132
Plastico pelletizado	0.000	0.033	0.017	0.011	0.008
Vidrio	0.000	0.000	0.017	0.022	0.025
Cemento	0.137	0.137	0.137	0.137	0.137

Los residuos plásticos pelletizados y los residuos de vidrio se muestran en la Figura 1. El material pelletizado (Figura 1a) con una densidad de 606 kg/m³ fue suministrado por la empresa químicos plásticos S.A. Los residuos de vidrio fueron recolectados de desperdicios de una marquetería, posteriormente molidos utilizando un molino casero, hasta alcanzar la apariencia mostrada en la Figura 1b, con el cual se alcanzó el tamaño máximo nominal granular de 9.5 mm. La densidad de los residuos de vidrio fue de 2500 kg/m³. Por efecto comparativo se preparó la mezcla 1:0 pero con plastico triturado (en forma de hojuelas).



Figura 1. a Residuos plásticos pelletizados. b. Residuos de vidrio

Elaboración de las mezclas y cilindros de hormigón

La mezcla inició humedeciendo la superficie interna de la concretadora. El agregado grueso fue humedecido durante 24 horas. El agregado grueso humedecido se mezcló por alrededor de 4 minutos con parte del agua de diseño (alrededor del 75%). Pasados los 4 minutos se agregó el cemento, el 25% restante del agua, los agregados finos, los residuos de vidrio molido y el material plástico, dejando mezclar durante 4 minutos adicionales. El asentamiento de cada una de las mezclas preparadas se midió tal como lo describe la norma técnica colombiana NTC 396 de 1992. Por cada mezcla de hormigón, se elaboraron 3 especímenes cilíndricos de 0.15 m de diámetro y 0.30 m de altura. 24 horas después los cilindros fueron desencofrados y sumergidos en agua de grifo por 28 días.

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 superficialmente. Se empleó un equipo de compresión simple pilot que operó a una velocidad de carga de 0.5 KN/s. El cálculo del módulo de elasticidad se llevó a cabo en un compresómetro-extensómetro marca Humbol.

Resultados y Discusión

La Figura 2 muestra el difractograma de los residuos de vidrio:

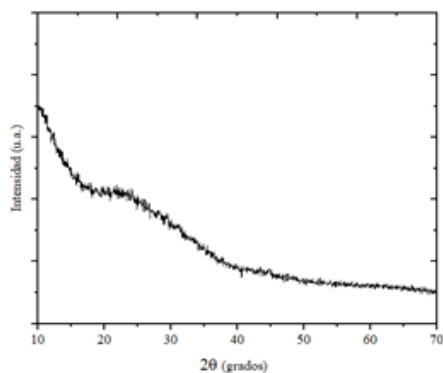


Figura 2. Preparación de los especímenes de concreto

Los resultados de la *Figura 2*, dan cuenta de la naturaleza amorfa del SiO₂ presente en los residuos de vidrio.

La *Figura 3* muestra los resultados del asentamiento de las mezclas preparadas:

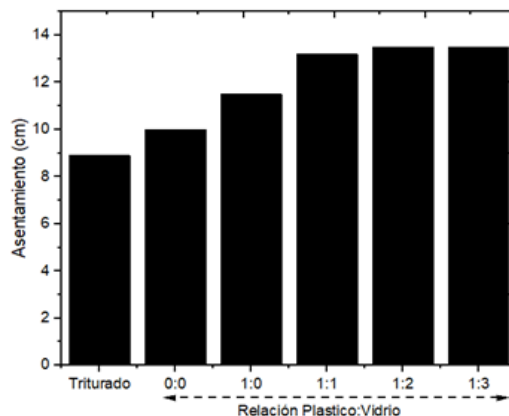


Figura 3. Asentamiento de las mezclas de hormigón

De la *Figura 3* se observa que la mezcla de hormigón preparado con 20% de residuo pelletizado (1:0), presentó un aumento del 15% del asentamiento con respecto al hormigón tradicional (0:0), el cual presentó un asentamiento de 10 cm, el aumento en el asentamiento de la mezcla 1:0 estuvo relacionado con la forma esférica y la superficie relativamente lisa de los pellets, lo que generó una disminución en la fricción, y por tanto una mejor dispersión de los agregados finos en la mezcla de hormigón. Los resultados encontrados están en concordancia con los reportes previos de otros autores [12], [13]. De la *Figura 3*, se observa que la incorporación de residuos plásticos en forma de hojuelas (triturado) genera una disminución del 11% con respecto al concreto tradicional en el asentamiento para el mismo porcentaje de reemplazo, comportamiento reportado previamente por Zaleska et al [24] y Dawood et al [25], quienes informaron de una disminución en el asentamiento asociado con la forma irregular del plástico triturado el cual presenta una textura de mayor rugosidad. De los resultados de la *Figura 3*, se observa que la incorporación de residuos de vidrio genera un aumento en el asentamiento de las mezclas de hormigón. Las mezclas de hormigón 1:1, 1:2 y 1:3 mostraron aumentos del 14.7%, 17.4% y 17.4%, respectivamente, tendencia que está relacionada con la nula absorción de los residuos de vidrio, lo que generó un aumento de la fluidez de la mezcla y por tanto un aumento en el asentamiento de las mezclas de concreto en estado fresco.

Los resultados de la densidad de las mezclas de hormigón se muestran en la *Figura 4*:

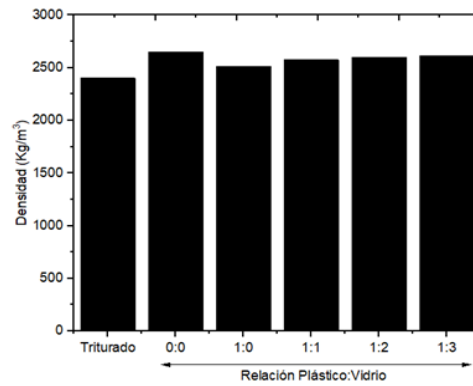


Figura 4. Densidad de las mezclas de hormigón

De los resultados de la *Figura 4*, se nota que la densidad del hormigón modificado con residuos plásticos disminuye con respecto al hormigón tradicional (2650 kg/m³), sin embargo, la disminución es mayor en el hormigón modificado con residuos plásticos triturados (9%) que en el hormigón preparado con residuos plásticos pelletizados (3%), lo cual es acorde a la menor densidad del plástico triturado (306 kg/m³) en comparación con el plástico pelletizado (609 kg/m³). Asimismo, de la *Figura 3*, se puede observar que la incorporación de residuos de vidrio no afecta de manera significativa la densidad de los especímenes de hormigón, de hecho, para los especímenes 1:1, 1:2 y 1:3, se encontraron incrementos del 2.3%, 3.3% y 3.8% con relación a la mezcla 1:0, respectivamente, lo cual es consecuencia de la mayor densidad de los residuos de vidrio en comparación con el plástico pelletizado.

Los resultados de la resistencia relativa a la compresión se muestran en la *Figura 5*:

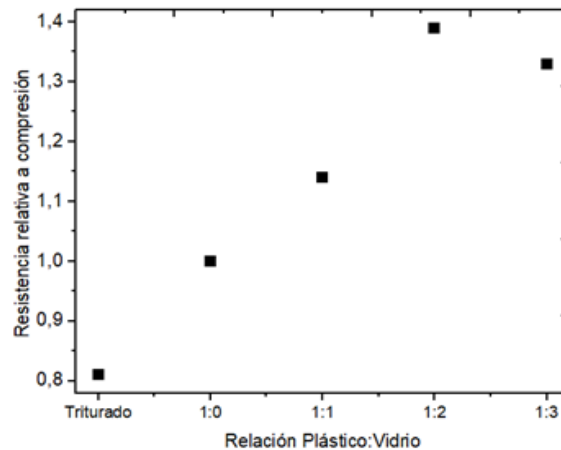


Figura 5. Resistencia relativa a la compresión de las muestras de hormigón

Los resultados de la *Figura 5* muestran que la resistencia a la compresión depende de la forma de los agregados plásticos, de hecho, se observa que la resistencia relativa a la compresión para el hormigón modificado con 20% de residuos plásticos triturados, en forma de hojuelas fue de 0.81, lo cual se asocia con la baja resistencia y la rigidez insignificante de los residuos plásticos triturados, en comparación con los agregados finos [26]. La reducción en la resistencia es acorde con los reportes previos de otros autores [27], [28], donde se ha informado de una disminución en la resistencia a la compresión relacionada

con la poca resistencia de la interfase existente entre los residuos de plásticos triturados y la pasta de cemento. De la *Figura 5* se observa que los hormigones preparados con el mismo porcentaje de plástico pelletizado presenta una mejor resistencia a la compresión comparada con el material pelletizado. Los resultados de la *Figura 5*, muestran que los hormigones con incorporación de residuos de vidrio, presentan una mejora en la resistencia a la compresión, se encuentra que las mezclas de hormigón 1:1, 1:2 y 1:3 presentan resistencias relativas de 1.14, 1.39 y 1.33, esta tendencia puede ser relacionada con la aparición de nuevos componentes en la matriz de hormigón, los cuales se genera por la reacción química entre los residuos de vidrio y el cemento, de los cuales se ha informado previamente que mejoran la resistencia a la compresión [29]. La *Figura 5* muestra que la adición de residuos de vidrio al plástico pelletizado mejora la resistencia a la compresión, el cual se logra gracias a la sinergia entre los residuos de vidrio y el cemento, debido a la naturaleza química de ambos materiales, los presentan SiO_2 dentro de su estructura, estos resultados son acordes con la literatura, previamente reportada, donde se ha informado que la incorporación de residuos de vidrio, intensifica la reacción puzolánica [30]. De los resultados experimentales se infiere que, en la preparación de hormigones modificados, el efecto combinado de plástico pelletizado y vidrio, mejora de manera significativa la resistencia a la compresión, sin embargo, se requiere profundizar en la caracterización de las mezclas de hormigón modificado, así como buscar cual es el mayor contenido de residuos de vidrio que se puede incorporar en los hormigones modificados con plásticos pelletizados que permita obtener la misma resistencia del hormigón tradicional.

Los resultados del modulo de elasticidad de los especímenes de hormigón mostraron que el modulo de elasticidad del concreto preparado solo con plastico pelletizado fue de 13.22 GPa, mientras que la incorporación de residuos de vidrio generó un aumentos del 7.5%, 9% y 8.4% con respecto al espécimen 1:0. De los resultados se encontró que el hormigón que contiene solamente residuos plásticos pelletizados presenta el menor módulo de elasticidad, fenómeno que está relacionado con la menor rigidez de los residuos plásticos en comparados con los agregados finos. Esta tendencia está en línea con los reportes de otros autores [13], [14]. Los resultados mostraron que el módulo de elasticidad aumenta con el aumento en el contenido de vidrio, dado que el módulo de elasticidad del vidrio es más alto que el de los plásticos, comportamiento relacionado con la mejor interacción del vidrio con los componentes de la matriz de concreto. De los resultados se encontró que el módulo de elasticidad del hormigón está directamente relacionado con la resistencia a la compresión, es decir un concreto modificado con resistencia alta constituye un módulo de elasticidad elevado, lo cual aumenta su utilidad en diversas aplicaciones, ya que proporciona un concreto que puede deformarse más antes de fallar.

Conclusiones

Con base en los resultados experimentales de este estudio, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

Se observó que un aumento en el contenido de vidrio incrementó el asentamiento en 14.7%, 17.4% y 17.4% en las mezclas 1:1, 1.2 y 1:3, respectivamente, con respecto a la mezcla que solo contiene plastico pelletizado, tendencia relacionada con la falta de absorción de agua del vidrio.

La densidad no se vio modificada de manera significativa con el aumento en el contenido de vidrio, se observaron aumentos del 2.3%, 3.3% y 3.8%, lo cual, es consecuencia de consecuencia de la mayor densidad de los residuos de vidrio en comparación con el plastico pelletizado

Se encontró un aumento en la resistencia a la compresión con el incremento en el contenido de vidrio, siendo la mezcla 1:2, la de mayor resistencia a la compresión, correspondiente a un incremento del 39% con respecto a la mezcla preparada solo con plástico pelletizado, comportamiento relacionado con la reacción química entre los residuos de vidrio y el cemento.

Referencias

- [1] S. Amena, “Utilizing solid plastic wastes in subgrade pavement layers to reduce plastic environmental pollution,” *Clean. Eng. Technol.*, vol. 7, p. 100438, 2022, doi: 10.1016/j.clet.2022.100438.
- [2] A. M. Hameed and B. A. F. Ahmed, “Employment the plastic waste to produce the light weight concrete,” *Energy Procedia*, vol. 157, no. 2018, pp. 30–38, 2019, doi: 10.1016/j.egypro.2018.11.160.
- [3] Y. Sun, S. Liu, P. Wang, X. Jian, X. Liao, and W. Q. Chen, “China’s roadmap to plastic waste management and associated economic costs,” *J. Environ. Manage.*, vol. 309, no. November 2021, p. 114686, 2022, doi: 10.1016/j.jenvman.2022.114686.
- [4] T. R. Walker, “(Micro)plastics and the UN Sustainable Development Goals,” *Curr. Opin. Green Sustain. Chem.*, vol. 30, p. 100497, 2021, doi: 10.1016/j.cogsc.2021.100497.
- [5] X. Li, T. Ling, and K. Hung, “Functions and impacts of plastic / rubber wastes as eco-friendly aggregate in concrete – A review,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 240, p. 117869, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117869.
- [6] E. Chuvieco, M. Burgui-Burgui, A. Orellano, G. Otón, and P. Ruíz-Benito, “Links between climate change knowledge, perception and action: Impacts on personal carbon footprint,” *Sustain.*, vol. 13, no. 14, pp. 1–19, 2021, doi: 10.3390/su13148088.
- [7] I. Almeshal, B. A. Tayeh, R. Alyousef, H. Alabduljabbar, A. Mustafa Mohamed, and A. Alaskar, “Use of recycled plastic as fine aggregate in cementitious composites: A review,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 253, p. 119146, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119146.
- [8] 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,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 256, p. 119447, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119447.
- [9] S. Bahij, S. Omary, F. Feugeas, and A. Faqiri, “Fresh and hardened properties of concrete containing different forms of plastic waste – A review,” *Waste Manag.*, vol. 113, pp. 157–175, 2020, doi: 10.1016/j.wasman.2020.05.048.
- [10] L. Gu and T. Ozbakkaloglu, “Use of recycled plastics in concrete: A critical review,” *Waste Manag.*, vol. 51, pp. 19–42, 2016, doi: 10.1016/j.wasman.2016.03.005.
- [11] L. Pezzi, P. De Luca, D. Vuono, F. Chiappetta, and A. Nastro, “Concrete products with waste’s plastic material (bottle, glass, plate),” vol. 516, pp. 1753–1758, 2006, doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.514-

516.1753.

- [12] O. F. Arbelaez-Perez, 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,” *Rev. Politécnica*, vol. 16, no. 31, pp. 77–84, 2020, doi: 10.33571/rpolitec.v16n31a6.
- [13] F. K. Alqahtani, G. Ghataora, M. I. Khan, and S. Dirar, “Novel lightweight concrete containing manufactured plastic aggregate,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 148, pp. 386–397, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.05.011.
- [14] S. I. Basha, M. R. Ali, S. U. Al-Dulaijan, and M. Maslehuddin, “Mechanical and thermal properties of lightweight recycled plastic aggregate concrete,” *J. Build. Eng.*, p. 101710, 2020, doi: 10.1016/j.job.2020.101710.
- [15] 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 Stud. Constr. Mater.*, vol. 16, no. February, p. e00934, 2022, doi: 10.1016/j.cscm.2022.e00934.
- [16] V. Tanwar, K. Bisht, K. I. S. Ahmed Kabeer, and P. V. Ramana, “Experimental investigation of mechanical properties and resistance to acid and sulphate attack of GGBS based concrete mixes with beverage glass waste as fine aggregate,” *J. Build. Eng.*, vol. 41, no. March, p. 102372, 2021, doi: 10.1016/j.job.2021.102372.
- [17] L. Bostanci, “Effect of waste glass powder addition on properties of alkali-activated silica fume mortars,” *J. Build. Eng.*, vol. 29, no. September 2019, p. 101154, 2020, doi: 10.1016/j.job.2019.101154.
- [18] C. Farinha, J. de Brito, and R. Veiga, “Incorporation of fine sanitary ware aggregates in coating mortars,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 83, pp. 194–206, 2015, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.03.028.
- [19] Y. Jani and W. Hogland, *Waste glass in the production of cement and concrete - A review*, vol. 2, no. 3. Elsevier, 2014.
- [20] M. C. Collivignarelli et al., “The production of sustainable concrete with the use of alternative aggregates: A review,” *Sustain.*, vol. 12, no. 19, pp. 1–34, 2020, doi: 10.3390/SU12197903.
- [21] K. H. Tan and H. Du, “Use of waste glass as sand in mortar: Part i - Fresh, mechanical and durability properties,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 35, no. 1, pp. 109–117, 2013, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2012.08.028.
- [22] Z. Z. Ismail and E. A. AL-Hashmi, “Recycling of waste glass as a partial replacement for fine aggregate in concrete,” *Waste Manag.*, vol. 29, no. 2, pp. 655–659, Feb. 2009, doi: 10.1016/j.wasman.2008.08.012.
- [23] S. Arivalagan and V. . Sethuraman, “Experimental study on the mechanical properties of concrete by partial replacement of glass powder as fine aggregate: An environmental friendly approach,” *Mater. Today Proc.*, no. xxxx, 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2020.09.722.

- [24] M. Záleská, Z. Pavlík, D. Čítek, O. Jankovský, and M. Pavlíková, “Eco-friendly concrete with scrap-tyre-rubber-based aggregate – Properties and thermal stability,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 225, pp. 709–722, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.07.168.
- [25] A. O. Dawood, H. AL-Khazraji, and R. S. Falih, “Physical and mechanical properties of concrete containing PET wastes as a partial replacement for fine aggregates,” *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 14, p. e00482, 2021, doi: 10.1016/j.cscm.2020.e00482.
- [26] B. A. Herki, J. M. Khatib, and E. M. Negim, “Lightweight concrete made from waste polystyrene and fly ash,” *World Appl. Sci. J.*, vol. 21, no. 9, pp. 1356–1360, 2013, doi: 10.5829/idosi.wasj.2013.21.9.20213.
- [27] Y. Wang, D. Joong, Y. Jic, and M. Lachemi, “Characteristics of mortar and concrete containing fine aggregate manufactured from recycled waste polyethylene terephthalate bottles,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 23, no. 8, pp. 2829–2835, 2009, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2009.02.036.
- [28] Y. W. Choi, D. J. Moon, J. S. Chung, and S. K. Cho, “Effects of waste PET bottles aggregate on the properties of concrete,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 35, no. 4, pp. 776–781, 2005, doi: 10.1016/j.cemconres.2004.05.014.
- [29] H. A. Elaqra, M. A. A. Haloub, and R. N. Rustom, “Effect of new mixing method of glass powder as cement replacement on mechanical behavior of concrete,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 203, pp. 75–82, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.01.077.
- [30] B. Balasubramanian, G. V. T. Gopala Krishna, V. Saraswathy, and K. Srinivasan, “Experimental investigation on concrete partially replaced with waste glass powder and waste E-plastic,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 278, p. 122400, 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122400.