

Efecto de la incorporación de residuos de vidrio en las propiedades del hormigón con poliestireno¹

Juan Pablo Carvajal Graciano², Daniel David Aguirre Sierra³, Werlin Valoyes Mena⁴, Oscar Felipe Arbeláez Pérez⁵

Resumen

Introducción: el hormigón preparado con poliestireno expandido (PE) es un material ambientalmente amigable, sin embargo, la resistencia a compresión es inferior a la observada en el hormigón tradicional, por lo cual, se requieren estrategias que mejoren esta propiedad. Este artículo informa el efecto que tiene la adición de vidrio (V) en las características de hormigón preparado con poliestireno como sustituto de los agregados finos. **Objetivo:** evaluar las características mecánicas y físicas del hormigón preparado con poliestireno sustituido por vidrio. **Metodología:** el hormigón se elaboró con 10 % de reemplazo en volumen del agregado fino. Se prepararon diferentes proporciones en

volumen PE: V 1:0, 1:1, 1:2, 1:3 y 1:4 (volumen PE +V = 10 % volumen del agregado fino). Se evaluó el asentamiento de las mezclas frescas, así como la resistencia y la densidad de los cilindros fraguados a los 28 días. La durabilidad se evaluó mediante la reacción álcali-sílice. **Resultados:** el incremento en el contenido de vidrio fue inversamente proporcional al asentamiento, adicionalmente, la incorporación de vidrio no afectó la densidad de manera significativa. La incorporación de residuos de vidrio aumentó de manera notable la resistencia a compresión, siendo la mezcla PE:V 1:3 la de mayor resistencia, 37.2 % superior al hormigón de referencia (1:0). Asimismo, para esta mezcla, la adición de vidrio no generó un efecto nocivo mediante la reacción álcali-sílice. **Conclusiones:** la adición

1 Artículo original de investigación científica derivado del proyecto de investigación Evaluación de las propiedades físicas y mecánicas de hormigones modificados con residuos plásticos termoestables; financiado por la Universidad Cooperativa de Colombia. En ejecución.

2 Ingeniero Civil de la Universidad Cooperativa de Colombia, Colombia. Integrante del Semillero de Investigación en Materiales y Estructuras. Correo electrónico: juan.carvajalg@campusucc.edu.co / ORCID:0000-0001-9051-8062.

3 Ingeniero Civil de la Universidad Cooperativa de Colombia, Colombia. Integrante del Semillero de Investigación en Materiales y Estructuras. Correo electrónico: daniel.aguirres@campusucc.edu.co / ORCID: 0000-0001-7639-7540.

4 Ingeniero Civil de la Universidad Cooperativa de Colombia, Colombia. Integrante del Semillero de Investigación en Materiales y Estructuras. Correo electrónico: werlin0699@gmail.com / ORCID:0000-0002-4907-6669.

5 Doctor en Ingeniería de la Universidad de Antioquia, Colombia. Profesor Asociado de la Universidad Cooperativa de Colombia. Integrante del Grupo de Investigación Termomec. Correo electrónico: oscar.arbelaez@campusucc.edu.co / ORCID:0000-0001-8592-5333

Autor para Correspondencia: oscar.arbelaez@campusucc.edu.co

Recibido: 08/05/2022 Aceptado: 04/11/2022

*Los autores declaran que no tienen conflicto de interés

de residuos de vidrio al hormigón preparado con poliestireno mejoró sus propiedades mecánicas, convirtiéndolo en un sistema potencial para reemplazar los precursores comúnmente empleados en la producción de hormigón.

Palabras clave: Hormigón modificado, resistencia a compresión, residuos de vidrio, propiedades mecánicas, poliestireno expandido

Effect of the incorporation of waste glass on the properties of polystyrene concrete

Abstract

Introduction: expanded polystyrene (EPS) concrete is an environmentally friendly material; however, its compressive strength is lower than traditional concrete, requiring the incorporation of materials that improve its compressive strength. This paper reports the effect of waste glass (WG) incorporation on the properties of concrete containing polystyrene as partial replacement of fine aggregate. **Objective:** to evaluate the effect of the incorporation of glass residues on the physical and mechanical properties of concrete made from polystyrene. **Methodology:** concrete was produced with 10 % by volume replacement of fine aggregate. Different EPS:WG volume ratio 1:0, 1:1, 1:2, 1:3 and 1:4 (volume EPS + WG = 10 % volume fine aggregates replacement) were

prepared. The slump of fresh mixtures was evaluated, density and compressive strength of hardened concrete at 28 days was evaluated; the durability was assessed through alkali silica reaction test. **Results:** an increasing in glass content was inversely proportional to slump, additionally, with the incorporation of glass, the density was not significantly affected. The incorporation of waste glass greatly increases the compressive strength, being the EPS:WG 1:3 mixture that showed the highest compressive strength, which was 37.2 % higher than reference concrete (1:0) was. Additionally, in 1:3 mixture was evidenced that the addition of waste glass does not lead to deleterious alkali silica reaction effect. **Conclusions:** the addition of waste glass to concrete prepared from expanded polystyrene improved its mechanical properties, making it a potential system to replace traditional materials used in concrete production.

Keywords: Modified concrete, compressive strength, waste glass, mechanical properties, expanded polystyrene.

Efeito da incorporação de resíduos de vidro nas propriedades do hormigón de poliestireno

Resumo

Introdução: o concreto de poliestireno expandido (EPS) é um material ecologicamente

correto; porém, sua resistência à compressão é inferior à do concreto tradicional, sendo necessária a incorporação de materiais que melhorem sua resistência à compressão. Este artigo relata o efeito da incorporação de vidro (V) nas propriedades do concreto contendo poliestireno como substituição parcial do agregado miúdo. **Objetivo:** avaliar o efeito da incorporação de resíduos de vidro nas propriedades físicas e mecânicas do concreto à base de poliestireno. **Metodologia:**

o concreto foi produzido com 10 % em volume de substituição do agregado miúdo. Diferentes razões de volume PE:V 1:0, 1:1, 1:2, 1:3 e 1:4 (volume PS + V = 10 % volume de substituição de agregados finos) foram preparadas. Avaliou-se o abatimento das misturas frescas, a densidade e a resistência à compressão do concreto endurecido aos 28 dias; a durabilidade foi avaliada através do teste de reação de sílica alcalina. **Resultados:** o aumento do teor de vidro foi inversamente proporcional ao abatimento, além disso, com a incorporação do vidro, a densidade não foi significativamente afetada. A incorporação de resíduos de vidro aumenta muito a resistência à compressão, sendo a mistura PE:V 1:3 que apresentou a

maior resistência à compressão, sendo 37,2 % superior ao concreto de referência (1:0). Adicionalmente, na mistura 1:3 foi evidenciado que a adição de resíduos de vidro não leva ao efeito deletério da reação de sílica alcalina. **Conclusões:** a adição de resíduos de vidro ao concreto preparado a partir de poliestireno expandido melhorou suas propriedades mecânicas, tornando-o um sistema potencial para substituir os materiais tradicionais utilizados na produção de concreto.

Palavras-chave: Hormigón Modificado, Resistência à Compressão, Resíduos de Vidro, Propriedades Mecânicas, Poliestireno Expandido

Introducción

Para el 2018, la producción mundial de residuos de poliestireno expandido fue de 2.95×10^6 toneladas, provenientes del envasado de alimentos y bebidas, embalaje, construcción y aislamiento térmico (de Paula et al., 2018). Esta gran cantidad de residuos genera graves problemas de contaminación, ocasionados por su baja tasa de degradación y reciclaje (Thorneycroft et al., 2018), la escasez de espacios para su acumulación y la contaminación de suelo y del agua (Olofinnade et al., 2020). Asimismo, la combustión de residuos de poliestireno genera una elevada emisión de gases contaminantes tales como CO_2 , CO, NO_x y SO_2 (Uttaravalli et al., 2020). La reutilización de los residuos de poliestireno en la preparación de hormigón, es una técnica ambientalmente amigable para su aprovechamiento, sin los riesgos medioambientales asociados a su vertimiento o combustión (Bahij et al., 2020), que potencia la preservación de los materiales empleados en la fabricación de hormigones (Gu & Ozbakkaloglu, 2016). Los efectos de la adición del poliestireno en las propiedades de carácter

mecánico y térmico del hormigón, dependen del tipo, la forma y el porcentaje de sustitución en la mezcla (Maghfouri et al., 2022), (Ojeda et al., 2020), (Pablo Ojeda, 2021). Xu et al (2015), informaron sobre hormigones preparados con sustituciones en volumen del 5 %, 10 %, 15 %, 20 %, 25 %, 30 %, 35 % y 40 % de los agregados finos y los gruesos, empleando relaciones agua cemento de 0.55 y 0.45. Los autores informaron que los residuos de poliestireno generan una disminución de la densidad con respecto al hormigón tradicional, y su disminución es inversamente proporcional al contenido de poliestireno, de hecho, para un porcentaje de reemplazo del 40 % y relaciones agua a cemento de 0.45 y 0.55, se presentaron descensos en la densidad del 51 % y del 38 %, respectivamente. De la misma manera, los autores encontraron que la resistencia a la compresión disminuye linealmente con las adiciones de poliestireno expandido; específicamente, esta disminuyó de 54 MPa en el hormigón tradicional a 6 MPa cuando se incorporó un 40 % de reemplazo en volumen de los agregados. Rosca et al (2020), dieron cuenta de la preparación de hormigones modificados con un volumen de reemplazo de 15 %, 25 % y 35 % de los finos por residuos de poliestireno expandido. Los autores notificaron

que tanto la densidad como la resistencia disminuye cuando aumenta el contenido de poliestireno expandido, resultados que están en línea con los reportes de Rosca et al (2021) y Cadere et al (2018), quienes demostraron que en los hormigones preparados con poliestireno como sustituto de los agregados finos, el contenido de poliestireno influye de manera positiva en la densidad y de manera negativa en la resistencia del hormigón. Los reportes de la literatura convergen en que las adiciones de poliestireno disminuyen la densidad del hormigón haciéndolo apropiado como hormigón liviano, sin embargo, debilita la rigidez del hormigón y la resistencia a la carga externa, limitando su uso como hormigón liviano de características no estructurales, por tanto, se requieren estrategias que permitan mejorar la resistencia de los hormigones preparados con poliestireno.

Debido a su composición química y características físicas similares a las de los agregados finos, los residuos de vidrio, han sido catalogados como sustitutos adecuados para estos precursores (Guo et al., 2020), convirtiéndolos en materiales estratégicos para mejorar las propiedades mecánicas del hormigón (Guo et al., 2020), (Nodehi & Mohamad Taghvaei, 2022). Naran et al (2022) dieron cuenta de una densidad decreciente del hormigón con el incremento de vidrio, tendencia atribuida a su menor densidad en comparación con los agregados finos, comportamiento en línea con los registros de Hamada et al (2022). Srikanth et al (2022) notificaron que la resistencia muestra un patrón creciente con el aumento del porcentaje de sustitución de vidrio, hasta un valor límite. Los especímenes de hormigón evaluados por Adaway y Wang (2015), presentaron una fuerza creciente cuando el contenido de vidrio aumenta hasta un 30% de sustitución. Asimismo, Hajimohammadi et al (2018) observaron que la resistencia del hormigón con vidrio es mayor que la muestra de control. Ibrahim (2017) encontró un resultado

prometedor de la resistencia cuando el contenido de vidrio aumenta hasta un 40 % de reemplazo. No obstante, la mejora evidenciada en las características del hormigón preparado con residuos de vidrio, lamentablemente, una gran parte de estos no se reciclan, sino que se desechan, y por tanto, causan graves problemas ecológicos y contaminación ambiental (Afshinnia & Rangaraju, 2015).

Dada la menor resistencia presentada por los hormigones preparados con poliestireno expandido y su mejora significativa, con la incorporación individual de residuos de vidrio, este trabajo tiene como propósito evaluar la incorporación de vidrio en las características físicas y mecánicas de hormigones preparados con poliestireno. Las mezclas de hormigón fueron elaboradas con un 10% de reemplazo en volumen de los agregados finos por poliestireno y residuos de vidrio en relaciones en volumen poliestireno:vidrio de 1:0, 1:1, 1:2, 1:3 y 1:4. El hormigón tradicional (0:0) fue preparado por efecto comparativo. Se evaluó el asentamiento de las mezclas de hormigón y las propiedades, entre ellas, la densidad y la resistencia a compresión de los cilindros de hormigón, después del fraguado a temperatura ambiente. Asimismo, dada la presencia de vidrio en los hormigones modificados, se evaluó la reacción álcali:sílice. Se espera incrementar la resistencia a la compresión del hormigón preparado con poliestireno adicionado con vidrio.

Materiales y métodos

Caracterización de los precursores

Las mezclas se prepararon con cemento tipo Portland (Holcim, de uso general) con una densidad 3040 kg/m³, medida acorde a la metodología ASTM C 188-95. Las características físicas de los finos y los gruesos son presentadas en la tabla 1.

Tabla 1. Caracterización de los agregados

Característica	Análisis	Agregados gruesos	Agregados finos
Masa unitaria no compactada (kg/m ³)	ASTM C29	1562	1502
Peso específico (kg/m ³)	ASTM C127	27636	26460
Porcentaje de absorción (%)	ASTM C127	0.65	1.44

Fuente: elaborada por los autores

Del análisis granulométrico, realizado acorde a la metodología ASTM D-422, en una tamizadora eléctrica de tamices de 8 pulgadas – 230V/60Hz), se extrajo el tamaño máximo (0.0254 m) y el módulo de finura (4.48) de los gruesos y los finos, respectivamente. Las perlas de poliestireno expandido y los residuos de vidrio presentaron una densidad aparente de 9.4 kg/m³ y de 1285 kg/m³, respectivamente. Se utilizó un espectrómetro de fluorescencia de rayos X, equipado con un tubo de Rh y una potencia de 4 kW, para determinar la

composición elemental del vidrio. Previo al análisis, los residuos de vidrio se trituraron en un molino de ágata y se tamizaron. Para el análisis, se formaron pastillas de 0.037 m de diámetro en una prensa de 120 kN, utilizando el material que atravesó por la malla 100 µm. Se utilizó un difractómetro de rayos X con radiación CuK α , que operó a 40000 V y 0.02 A, para determinar el patrón de difracción de los residuos de vidrio. El patrón de difracción se registró entre 5° a 70°, con un paso de 0.06° y un tiempo por paso de 3 s.

La Figura 1 muestra los residuos de vidrio (a) y las perlas de poliestireno (b) utilizados en la preparación del hormigón.



(a)

(b)

Figura 1. (a) Residuos de vidrio y (b) poliestireno

Fuente: elaborada por los autores

Diseño de la mezcla

La mezcla de hormigón tradicional fue diseñada como está descrito en la normatividad ACI 211.1-91, empleando una relación entre el cemento y el agua de 1.72 y una resistencia promedio de 28 MPa. Se prepararon 6 mezclas, una mezcla de hormigón tradicional (0:0), y 5 mezclas con sustitución del 10 % en volumen de los agregados finos, 1 de ellas para estudiar

el efecto individual del poliestireno, denotada como 1:0, la cual fue el espécimen de control y 4 mezclas que incorporan residuos de vidrio, las mezclas fueron denominadas como 1:1, 1:2, 1:3 y 1:4, donde la mezcla 1:2 representa 1 parte en volumen de poliestireno y 2 partes en volumen de residuos de vidrio, del volumen total de sustitución de los agregados finos (10 %). Las cantidades de materiales son presentadas en la tabla 2.

Tabla 2. Cantidades de materiales en las mezclas. (kg de material por m³ de hormigón preparado).

Mezcla	Agua	Cemento	Ag. fino	Ag. grueso	Poliestireno	Residuos de Vidrio
0:0	244	511	1631	545	0	0
1:0	244	511	1459	545	2.270	0
1:1	244	511	1459	545	1.130	1.135
1:2	244	511	1459	545	0.755	1.514
1:3	244	511	1459	545	0.568	1.703
1:4	244	511	1459	545	0.454	1.816

Fuente: elaborada por los autores

Elaboración de las mezclas y especímenes de hormigón

Las mezclas de hormigón se prepararon como lo informa la norma ASTM C192 utilizando una concretadora de 180 kg – 850W/27 rpm/50Hz). Para preservar la humedad natural de los agregados, la concretadora se humedece previamente a la elaboración de la mezcla. Inicialmente, se agregó el material grueso, el 70 % del agua y se dejó mezclar por tres minutos, luego se le adiciona el cemento, los agregados finos, el poliestireno, los residuos de vidrio (en el caso que aplicaba) y el 30 % del agua faltante. La mezcla se agitó por 4 minutos

más, hasta visualizar una mezcla cohesiva. El comportamiento del hormigón en estado fresco, se analizó mediante el asentamiento acorde a lo descrito por la metodología ASTM C143. Las mezclas de hormigón se prepararon por triplicado, repitiendo el mismo procedimiento en cada uno de los lotes. Por cada una de las mezclas se elaboraron 3 cilindros de hormigón, para un total de 9 especímenes cilíndricos de 0.1 m de diámetro y 0.2 m de longitud (Figura 2). Pasadas 24 horas de la preparación de los cilindros, estos se retiraron de los moldes cilíndricos y se sumergieron en un tanque de curado con agua a temperatura ambiente (27 °C ± 1.5 °C) por 28 días.



Figura 2. Preparación de los especímenes de hormigón

Fuente: elaborada por los autores

Evaluación de las propiedades físicas y mecánicas

Pasados los días de curado (28), los cilindros fueron removidos del tanque e inmediatamente, se calculó la densidad (masa del cilindro por unidad de volumen) y la resistencia a la compresión, utilizando para esta última, un equipo automático de compresión simple, operando a 500 N/s.

Dado que los hormigones que incorporan residuos de vidrio pueden producir problemas de reacción álcali-sílice, generando problemas de durabilidad en la mezcla de hormigón. En este trabajo, la prueba de reacción álcali sílice se evaluó para el hormigón 1:0 y el de mayor resistencia a compresión. La prueba de reacción de sílice alcalina se realizó como lo describe la metodología ASTM C1260. Por cada mezcla, se prepararon tres barras de prueba. Las mezclas se fraguaron sumergiéndolas

en agua durante 24 h y luego se almacenaron en un recipiente cerrado en una solución de NaOH 1 N a 80 °C. El cambio de longitud de las barras de hormigón se midió en intervalos regulares de hasta 14 días utilizando galgas extensométricas mecánicas con una precisión de menos de 0.002 mm.

Resultados

El análisis químico permitió identificar que el SiO_2 (69.97 %) es el elemento de mayor porcentaje en los residuos de vidrio, sin embargo, también contiene CaO (11.31 %), Na_2O (15.41%), Al_2O_3 (1.26 %), MgO (0.74 %), Fe_2O_3 (0.23 %), K_2O (0.51%) y otros elementos en menores proporciones. La composición química del vidrio es característica de puzolanas tipo N. El patrón de difracción del vidrio es presentado en la Figura 3.

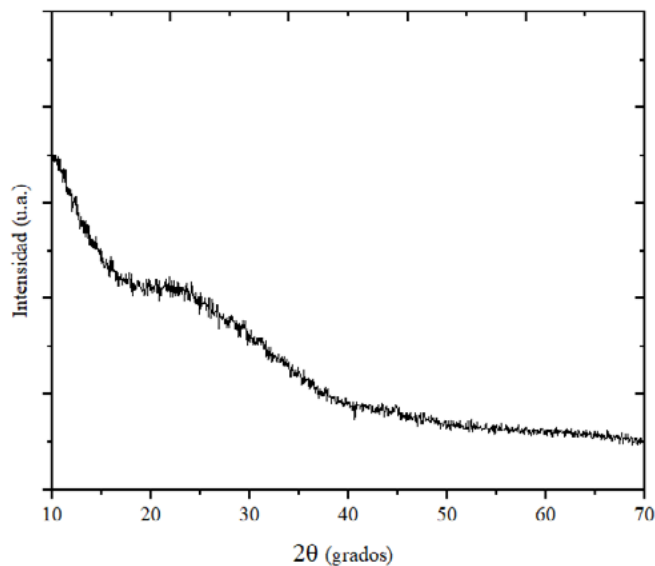


Figura 3. DRX de los residuos de vidrio

Fuente: elaborada por los autores

Como se puede observar de la Figura 3, la inexistencia de picos de difracción es característico de la naturaleza no cristalina del SiO_2 presente en el vidrio.

La figura 4 presenta el asentamiento de las mezclas preparadas.

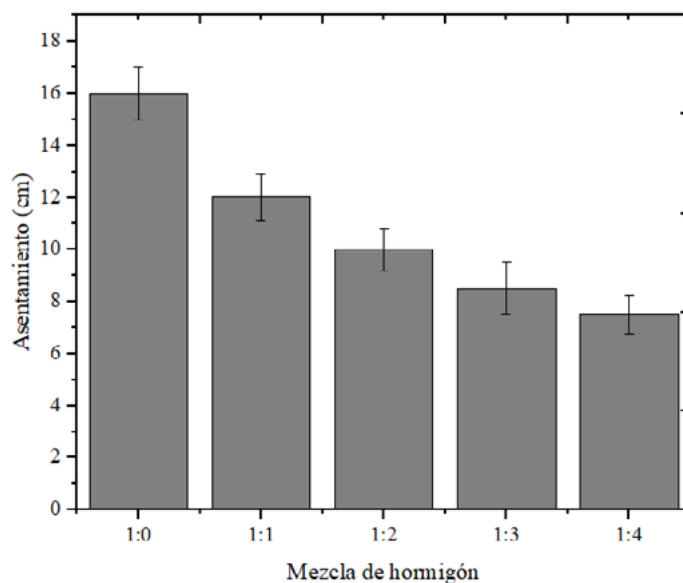


Figura 4. Asentamiento de las mezclas preparadas

Fuente: elaborada por los autores

La Figura 4, muestra que la presencia de poliestireno y de residuos de vidrio modifican el asentamiento de las mezclas de hormigón tradicional, con asentamiento de 0.14 m

(no presentado). La densidad en estado endurecido, y su porcentaje de incremento, se muestra en la tabla 3.

Tabla 3. Densidad promedio y porcentaje de variación.

Mezcla	0:0	1:0	1:1	1:2	1:3	1:4
Densidad (Kg/m ³)	2537±12	2342±9	2480±14	2500±10	2511±11	2520±15
% variación*	—	-7.7**	5.9	6.7	7.2	7.6

* con respecto a la mezcla 1:0, **con respecto a la mezcla 0:0

Fuente: elaborada por los autores

Los valores presentados en la tabla 3 demuestran que la densidad del hormigón tradicional 0:0 (2537 kg/m³), se vio modificada por la incorporación de residuos de poliestireno. La mezcla preparada solo con residuos de poliestireno (1:0), presenta la menor densidad entre todos los especímenes, 2342 kg/m³, equivalente a una disminución del 7.7 %, comportamiento relacionado con la menor densidad del poliestireno (9.4 kg/m³)

en relación a la presentada por los agregados finos (2700 kg/m³), de hecho, la densidad del hormigón preparado con residuos de poliestireno, se encuentra dentro del rango de la densidad de los hormigones livianos (menor a 2400 kg/m³) (Pecce et al., 2015).

La resistencia calculada al día 28 para todos los especímenes de hormigón, se reporta en la Figura 5.

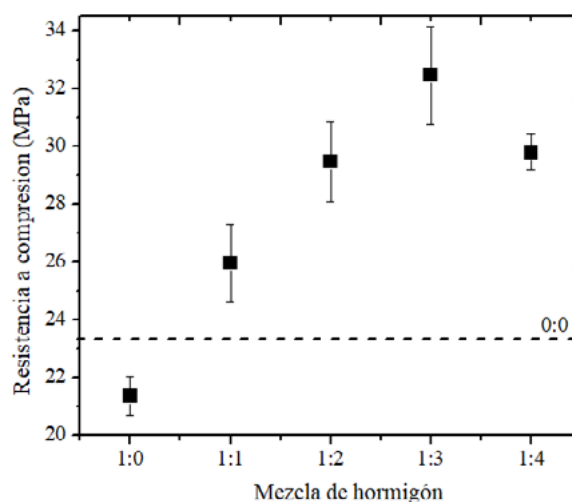


Figura 5. Resistencia de los especímenes.

Fuente: elaborada por los autores

Discusión

Los resultados presentados en la Figura 4 mostraron que el aumento del asentamiento en el hormigón que incorpora individualmente poliestireno, es atribuible a su naturaleza hidrófoba y la menor fricción interna, resultante de la sustitución de finos, de forma angular, por residuos de poliestireno, los cuales presentan forma esférica y superficie relativamente lisa. Para las mezclas combinadas con poliestireno y vidrio, un aumento en la cantidad de estos últimos está directamente relacionado con la disminución en el asentamiento, de hecho, las muestras 1:1, 1:2, 1:3 y 1:4, presentan disminuciones del 47 %, 37 %, 47 % y 53 % con respecto al hormigón 1:0 (preparado solo con poliestireno), resultados que están en coherencia con los resultados previos de otros autores (Tamanna et al., 2020a), quienes reportaron que la incorporación de vidrio disminuye el asentamiento como resultado del incremento de la fricción de la mezcla, fenómeno asociado con la forma irregular, los bordes afilados y el alto grado de rugosidad de los residuos de vidrio. La densidad promedio presentó un aumento del 5.9 %, 6.7 %, 7.2 % y 7.6 % para las muestras de hormigón 1:1, 1:2, 1:3 y 1:4, respectivamente, lo cual fue asociado con la mayor densidad de los residuos de vidrio, cuando esta es comparada con la densidad del poliestireno, sin embargo, este aumento es poco significativo con respecto al hormigón 1:0.

Se encontró que una sustitución del 10 % del material fino por perlas de poliestireno (mezcla 1:0) expandido provoca un descenso del 9.8 % en la resistencia (21.4 MPa) con respecto al hormigón tradicional (23.67 MPa). Esta reducción, ha sido previamente reportada por Xu y colaboradores (2015) y Nikbin y colaboradores (2018), quienes registraron disminuciones del 39.5 % y del 38.8 %, para un reemplazo del 10 % de los agregados por poliestireno, respectivamente. Esta tendencia relacionada está asociada a la naturaleza del

poliestireno, material que presenta resistencia y rigidez insignificante en comparación con los agregados pétreos. Asimismo, se ha informado que la presencia de poliestireno expandido en la preparación de hormigones conlleva a un aumento del área superficial de las partículas, lo que genera un debilitamiento de la zona interfacial que se forma entre los materiales pétreos y la pasta de cemento generando una reducción en la resistencia (Wu et al., 2022). La disminución en la resistencia a compresión con la incorporación de materiales plásticos, está en línea con los reportes previos de la literatura (Ojeda et al., 2020), (Mercante et al., 2018), (Ohemeng & Ekolu, 2019), fenómeno atribuido a la poca fuerza adhesiva entre la superficie del plástico y la pasta de cemento. La Figura 5 muestra que la incorporación de residuos de vidrio aumenta la resistencia a la compresión. Las muestras 1:1, 1:2, 1:3 y 1:4 presentaron aumentos del 9.7 %, 24.5 %, 37.2 % y 25.9 % con respecto al material tradicional, efecto que está asociado al incremento en el contenido de vidrio, y en concordancia con los reportes de (Su et al., 2015) y (Mallum et al., 2022), quienes argumentaron que el incremento de la resistencia de hormigones que incorporan individualmente residuos de vidrio, se asocia con el menor contenido de aire y la aparición de nuevos componentes en el hormigón, generados por la reactividad de los residuos de vidrio y el cemento, además del efecto de relleno del vidrio dentro de la matriz del hormigón (Elaqra et al., 2019).

De la Figura 5 se observó que la incorporación de vidrio al poliestireno mejora la resistencia a compresión, lo que se logra por la sinergia entre los materiales, y en línea con los reportes de la literatura relacionada con la preparación de hormigones con residuos plásticos y de vidrio, donde se observó una sinergia entre el relleno de los poros, dado que la incorporación de vidrio intensifica la reacción puzolánica gracias a su elevado contenido de silicio (Balasubramanian et al., 2021). De la Figura 5, se encontró que la mezcla

1:3 presentó un máximo en la resistencia, comportamiento similar a los reportes de la literatura para hormigones que incorporan residuos de vidrio, con una tendencia parabólica entre la resistencia y el contenido de vidrio, particularmente, reemplazos por encima de determinado contenido de vidrio generan un debilitamiento de la zona interfacial del hormigón, lo que provoca un descenso en la resistencia. (Tamanna et al., 2020b).

Los resultados de la reacción álcali sílice, mostraron que el espécimen de hormigón de control 1:0 mostró una expansión de 0.09 % a los 28 días, mientras que el hormigón 1:3 mostró una expansión reducida de 0.06 %, por lo que se infiere que la adición de residuos de vidrio no libera suficiente álcali para causar reacciones perjudiciales. Tanto la mezcla de control (1:0) como la mezcla 1:3 presentaron expansiones por debajo de 0.1 % (límite aceptable acorde a la norma ASTM C 126014) (Sun et al., 2021). Las pruebas de expansión mostraron que la mezcla 1:3, no solo no era expansiva como resultado de una posible reacción álcali-sílice, sino que ayudó a reducir la expansión de la mezcla 1:0. Este comportamiento está relacionado con la reducción directa del álcali disponible porque el $\text{Ca}(\text{OH})_2$ liberado por la hidratación del cemento es consumido al reaccionar con los residuos de vidrio generando un descenso en la alcalinidad del sistema.

De los resultados, se evidenció que los residuos de vidrio aumentan la densidad del hormigón preparado solo con poliestireno, el cual, ha sido reportado como un hormigón liviano, sin embargo, el incremento de la resistencia lo convierte en un sistema potenciales para aplicaciones estructurales. La mezcla 1:3 mostró un aumento del 7.2 % de la densidad, sin embargo, un aumento del 37.2 % de la resistencia es mucho más significativo.

Conclusiones

En este trabajo se evaluaron las propiedades del hormigón preparado con poliestireno expandido y con incorporación de vidrio. Los resultados fueron una evidencia clara de que la introducción de perlas de poliestireno expandido y residuos de vidrio induce una modificación de las características del hormigón. Se encontró que el asentamiento disminuyó y la densidad incrementó con el aumento en el contenido de residuos de vidrio, tendencia asociada con la geometría irregular del vidrio y su mayor densidad, respectivamente. Asimismo, se encontró una mejora significativa de la resistencia a compresión con el aumento de residuos de vidrio, siendo la muestra de hormigón 1:3 la de mayor resistencia, 37.2 % por encima del hormigón preparado solo con poliestireno (1.0). Asimismo, la adición de vidrio no produjo un efecto álcali sílice nocivo para este porcentaje de reemplazo. Los resultados evidenciaron que cuando se adicionan residuos de vidrio aumenta la densidad y la resistencia del hormigón elaborado con poliestireno, sin embargo, el aumento en la resistencia se hace más significativo que el aumento en la densidad, lo que permite potenciar su uso como hormigones de densidad moderada y características estructurales.

Agradecimientos

Los autores agradecen al proyecto INV3167 por el apoyo financiero en el desarrollo de este trabajo de investigación, además, a la empresa FC y FC constructora S.A.S. por proporcionar los materiales, así como a la empresa SGS por facilitar las instalaciones para la elaboración y curado de las mezclas de hormigón. J.C, D.A y W. V agradecen especialmente al semillero de investigación en materiales y estructuras.

Referencias

- Adaway, M., & Wang, Y. J. E. J. O. S. E. (2015). Recycled glass as a partial replacement for fine aggregate in structural concrete—Effects on compressive strength. *Electronic Journal of Structural Engineering*, 14, 116–122. <https://doi.org/10.56748/ejse.141951>
- Afshinnia, K., & Rangaraju, P. R. (2015). Influence of fineness of ground recycled glass on mitigation of alkali-silica reaction in mortars. *Construction and Building Materials*, 81, 257–267. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.041>
- Bahij, S., Omary, S., Feugeas, F., & Faqiri, A. (2020). Fresh and hardened properties of concrete containing different forms of plastic waste – A review. *Waste Management*, 113, 157–175. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.05.048>
- Balasubramanian, B., Gopala Krishna, G. V. T., Saraswathy, V., & Srinivasan, K. (2021). Experimental investigation on concrete partially replaced with waste glass powder and waste E-plastic. *Construction and Building Materials*, 278, 122400. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122400>
- Cadere, C. A., Barbuta, M., Rosca, B., Serbanoiu, A. A., Burlacu, A., & Oancea, I. (2018). Engineering properties of concrete with polystyrene granules. *Procedia Manufacturing*, 22, 288–293. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.03.044>
- De Paula, F. G. F., De Castro, M. C. M., Ortega, P. F. R., Blanco, C., Lavall, R. L., & Santamaría, R. (2018). High value activated carbons from waste polystyrene foams. *Microporous and Mesoporous Materials*, 267, 181–184. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2018.03.027>
- Elaqra, H. A., Haloub, M. A. A., & Rustom, R. N. (2019). Effect of new mixing method of glass powder as cement replacement on mechanical behavior of concrete. *Construction and Building Materials*, 203, 75–82. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.077>
- Gu, L., & 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>
- Guo, P., Meng, W., Nassif, H., Gou, H., & Bao, Y. (2020). New perspectives on recycling waste glass in manufacturing concrete for sustainable civil infrastructure. *Construction and Building Materials*, 257, 119579. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119579>
- Hajimohammadi, A., Ngo, T., & Kashani, A. (2018). Glass waste versus sand as aggregates: The characteristics of the evolving geopolymer binders. *Journal of Cleaner Production*, 193, 593–603. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.086>
- Hamada, H., Alattar, A., Tayeh, B., Yahaya, F., & Thomas, B. (2022). Effect of recycled waste glass on the properties of high-performance concrete: A critical review. *Case Studies in Construction Materials*, 17, e01149. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01149>
- Ibrahim, K. I. M. (2017). The Effect of Using Waste Glass [WG] as Partial Replacement of sand on Concrete. *Journal of Mechanical and Civil Engineering*, 14, 41–45. <https://doi.org/10.9790/1684-1402024145>

- Maghfouri, M., Alimohammadi, V., Gupta, R., Saberian, M., Azarsa, P., Hashemi, M., Asadi, I., & Roychand, R. (2022). Drying shrinkage properties of expanded polystyrene (EPS) lightweight aggregate concrete: A review. *Case Studies in Construction Materials*, 16, e00919. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e00919>
- Mallum, I., Abdul, A. R., Lim, N. H. A. S., & Omolayo, N. (2022). Sustainable Utilization of Waste Glass in Concrete: A Review. *Silicon*, 14, 3199–3214. <https://doi.org/10.1007/s12633-021-01152-x>
- Mercante, I., Alejandrino, C., Ojeda, J. P., Chini, J., Maroto, C., & Fajardo, N. (2018). Mortar and concrete composites with recycled plastic: A review. *Science and Technology of Materials*, 30, 69–79. <https://doi.org/10.1016/j.stmat.2018.11.003>
- Naran, J. M., Gonzalez, R. E. G., del Rey Castillo, E., Toma, C. L., Almesfer, N., van Vreden, P., & Saggi, O. (2022). Incorporating waste to develop environmentally-friendly concrete mixes. *Construction and Building Materials*, 314(PA), 125599. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125599>
- Nikbin, I. M., & Golshekan, M. (2018). The effect of expanded polystyrene synthetic particles on the fracture parameters, brittleness and mechanical properties of concrete. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 94, 160–172. <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2018.02.002>
- Nodehi, M., & Mohamad Taghvaei, V. (2022). Sustainable concrete for circular economy: a review on use of waste glass. *Glass Structures and Engineering*, 7(1), 3–22. <https://doi.org/10.1007/s40940-021-00155-9>
- Ohemeng, E. A., & Ekololu, S. O. (2019). Strength prediction model for cement mortar made with waste LDPE plastic as fine aggregate. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, 8(4), 228–243. <https://doi.org/10.1080/21650373.2019.1625826>
- Ojeda, J. P., Mercante, I. T., & Fajardo, N. H. (2020). Mechanical tests on mortars with recycled plastic aggregates dosed under a model of thermal conductivity. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 36(2), 465–474. <https://doi.org/10.20937/RICA.53452>
- Olofinnade, O., Chandra, S., & Chakraborty, P. (2020). Recycling of high impact polystyrene and low-density polyethylene plastic wastes in lightweight based concrete for sustainable construction. *Materials Today: Proceedings*, 38, 2151–2156. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.176>
- Ojeda, J. P. (2021). A meta-analysis on the use of plastic waste as fibers and aggregates in concrete composites. *Construction and Building Materials*, 295, 123420. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123420>
- Pecce, M., Ceroni, F., Bibbò, F. A., & Acierno, S. (2015). Steel-concrete bond behaviour of lightweight concrete with expanded polystyrene (EPS). *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 48(1–2), 139–152. <https://doi.org/10.1617/s11527-013-0173-7>
- Rosca, B. (2021). Comparative aspects regarding a novel lightweight concrete of structural grade containing brick aggregate as coarse particles and expanded polystyrene beads. *Materials Today: Proceedings*, 45(6),

- 4979-4986. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.415>
- Rosca, B., & Corobceanu, V. (2020). Structural grade concrete containing expanded polystyrene beads with different particle distributions of normal weight aggregate. *Materials Today: Proceedings*, 42(2), 548-554. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.517>
- Shiva Srikanth, K., & Lalitha, G. (2022). Durability properties of self compacting concrete partial replacement of fine aggregate with waste crushed glass. *Materials Today: Proceedings*, 51(8), 2411-2416. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.11.594>
- Su, H., Yang, J., Ling, T., Ghataora, G. S., & Dirar, S. (2015). Properties of concrete prepared with waste tyre rubber particles of uniform and varying sizes. *Journal of Cleaner Production*, 91, 288-296. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.12.022>
- Sun, L., Zhu, X., Kim, M., & Zi, G. (2021). Alkali-silica reaction and strength of concrete with pretreated glass particles as fine aggregates. *Construction and Building Materials*, 271, 121809. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121809>
- Tamanna, N., Tuladhar, R., & Sivakugan, N. (2020a). Performance of recycled waste glass sand as partial replacement of sand in concrete. *Construction and Building Materials*, 239, 117804. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117804>
- Tamanna, N., Tuladhar, R., & Sivakugan, N. (2020b). Performance of recycled waste glass sand as partial replacement of sand in concrete. *Construction and Building Materials*, 239, 117804. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117804>
- Thorneycroft, J., Orr, J., Savoikar, P., & Ball, R. J. (2018). Performance of structural concrete with recycled plastic waste as a partial replacement for sand. *Construction and Building Materials*, 161, 63-69. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.127>
- Uttaravalli, A. N., Dinda, S., & Gidla, B. R. (2020). Scientific and engineering aspects of potential applications of post-consumer (waste) expanded polystyrene: A review. *Process Safety and Environmental Protection*, 137, 140-148. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.02.023>
- Wu, J. D., Guo, L. P., Cao, Y. Z., & Lyu, B. C. (2022). Mechanical and fiber/matrix interfacial behavior of ultra-high-strength and high-ductility cementitious composites incorporating waste glass powder. *Cement and Concrete Composites*, 126, 104371. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104371>
- Xu, Y., Xu, J., Jiang, L., Chu, H., & Li, Y. (2015). Prediction of compressive strength and elastic modulus of expanded polystyrene lightweight concrete. *Magazine of Concrete Research*, 67(17), 954-962. <https://doi.org/10.1680/mac.14.00375>