

Aprovechamiento de residuo de vidrio como reemplazo parcial del agregado fino en mezclas de concreto

Utilization of Glass Waste as a Partial Replacement for Fine Aggregate in Concrete Mixtures

 William Gustavo Valencia-Saavedra¹;  Carolina Gómez-Rojas¹;  Ana María Revelo-Restrepo¹;  Ruby Mejía-de-Gutiérrez¹

¹Universidad del Valle, Cali-Colombia

Correspondencia: william.gustavo.valencia@correounivalle.edu.co

Recibido: 16 Noviembre 2024

Aceptado: 15 Julio 2025

Disponible: 28 Julio 2025

Cómo citar / How to cite

W. G. Valencia-Saavedra, C. Gómez-Rojas, A. M. Revelo-Restrepo, and R. Mejía-de-Gutiérrez, "Aprovechamiento de residuo de vidrio como reemplazo parcial del agregado fino en mezclas de concreto," *TecnoLógicas*, vol. 28, no. 63, e3317, 2025. <https://doi.org/10.22430/22565337.3317>



Resumen

El aumento de la población y el crecimiento industrial han incrementado la demanda de infraestructura y vivienda, elevando el consumo de concreto y su impacto ambiental. Esto ha motivado la búsqueda de alternativas sostenibles para reemplazar parcial o totalmente las materias primas del concreto. En este contexto, el objetivo del presente estudio fue evaluar el uso de residuos de vidrio (RV) como sustituto parcial del agregado fino natural (AFN) en la producción de concreto, y validar su aplicación en un elemento constructivo de carácter estructural. El agregado de RV se obtuvo a partir de trituración y molienda de botellas, su módulo de finura y absorción fueron 3,35 y 0,2 %, respectivamente. La metodología empleada consistió en evaluar las propiedades físicas, mecánicas y térmicas de mezclas de concreto con reemplazo de AFN por RV en proporciones de hasta 40 %. Complementariamente se estudió el desempeño del concreto a altas temperaturas (hasta 900°C) y se produjeron bloques. Los resultados obtenidos demostraron que el RV mejora la trabajabilidad del concreto hasta en un 69 %, reduce la absorción en un 23 % y la porosidad en un 19 %. Además, las propiedades de conductividad y difusividad térmica disminuyeron hasta un 19 % al emplear un 40 % de RV. El concreto mostró un mejor desempeño frente a exposición térmica directa sin afectación significativa en la resistencia a compresión para reemplazos de hasta 30 %. No obstante, se observó una reducción de hasta el 20 % en la resistencia a flexión. Finalmente, se concluye que los concretos con hasta 40 % de RV pueden ser empleados en la fabricación de bloques, los cuales pueden ser clasificados como estructurales de categoría alta acorde con la Norma Técnica Colombiana NTC 4026. Esta aplicación es considerada como una solución viable para la valorización de residuos de vidrio bajo un enfoque de economía circular.

Palabras clave

Aprovechamiento de residuos, bloques de concreto, economía circular, propiedades térmicas, vidrio reciclado en la construcción.

Abstract

Population growth and industrial growth have increased the demand for infrastructure and housing, increasing concrete consumption and its environmental impact. This has motivated the search for sustainable alternatives to partially or completely replace raw materials used in concrete. In this context, the objective of this study was to evaluate the use of waste glass (WG) as a partial substitute for natural fine aggregate (NFA) in the production of concrete and to validate its application in a structural construction element. The WG aggregate was obtained from the crushing and grinding of bottles; its fineness and absorption modulus were 3.35 and 0.2%, respectively. The methodology employed consisted of evaluating the physical, mechanical, and thermal properties of concrete mixtures with WG replaced by WG in proportions of up to 40%. In addition, the performance of the concrete was studied at high temperatures (up to 900°C) and blocks were produced. The results obtained demonstrated that WG improves the concrete workability by up to 69%, reduces absorption by 23%, and porosity by 19%. Furthermore, the thermal conductivity and diffusivity properties decreased by up to 19% when using 40% RV. The concrete showed improved performance under direct thermal exposure, with no significant impact on compressive strength for replacements of up to 30%. However, a reduction of up to 20% in flexural strength was observed. Finally, it is concluded that concretes with up to 40% RV can be used in the manufacture of blocks, which can be classified as structural blocks of high category according to the Colombian Technical Standard NTC 4026. This application is considered a viable solution for the recovery of glass waste under a circular economy approach.

Keywords

Waste utilization, concrete blocks, circular economy, thermal properties, recycled glass in construction.

1. INTRODUCCIÓN

El crecimiento poblacional y la expansión de actividades industriales han intensificado la necesidad de infraestructura, lo que ha conllevado a un incremento significativo en el consumo de concreto. Esta tendencia conlleva impactos ambientales significativos, entre ellos la emisión de gases contaminantes, el agotamiento de recursos naturales y la acumulación de residuos sólidos provenientes de la construcción y demolición [1]. Uno de los residuos sólidos de mayor volumen generado en este sector y a nivel urbano es el vidrio (RV), la razón es el excesivo consumo de artículos de vidrio; a nivel mundial se estima que se producen 209 millones de toneladas de vidrio anualmente [2]. En 2018, de acuerdo con estimaciones del Banco Mundial, se recolectaron aproximadamente 2,01 mil millones de toneladas de residuos de vidrio a nivel global, y se prevé que esta cifra aumente a 3,40 mil millones de toneladas para el año 2050 [3]. Específicamente, en Estados Unidos se generaron cerca de 12,27 millones de toneladas de residuos de vidrio, mientras en la Unión Europea la cifra fue de 14,5 millones de toneladas [2]. La mayor parte de estos residuos proviene de fuentes urbanas e industriales, predominantemente de envases utilizados para alimentos y bebidas.

La sostenibilidad ambiental promueve la optimización en el aprovechamiento de los recursos naturales y una gestión responsable de los residuos generados tanto en contextos domésticos como industriales. Este enfoque ha motivado múltiples investigaciones orientadas a explorar estrategias de recuperación y reutilización de materiales [4], [5]. En Colombia, en 2020 se disponían 32580 toneladas/día de residuos sólidos, valor superior en un 0,89 % respecto a 2019 [6]. La Superintendencia de Servicios Públicos domiciliarios reportó un incremento en el aprovechamiento de los residuos sólidos, destacando papel y cartón (53,57 %), plásticos (26 %), metales (12,53 %) y vidrio (7,0 %) [7]. Este bajo porcentaje sugiere una oportunidad para aumentar el reciclaje de vidrio en Colombia, el cual ofrece beneficios ambientales como la disminución de emisiones de CO₂, la reducción de residuos en vertederos y la disminución de la extracción de materias primas para diversos procesos industriales.

En la actualidad, diferentes países han implementado aplicaciones orientadas al sector de la construcción, específicamente en remplazo de cemento y agregados. En Australia y Nueva Zelanda, existen lineamientos para el uso de vidrio triturado en infraestructura vial. En Estados Unidos, hay especificaciones como WSDOT, ODT, CalTrans, NHDOT y ASSHTO M 318 que permiten el uso del vidrio como agregado. Diferentes investigaciones [3], [8]-[14] han demostrado que el vidrio reciclado puede ser un sustituto eficaz de la arena en la construcción.

En Cali, la extracción de agregados finos genera un impacto ambiental significativo debido a la sobreexplotación ilegal de arena en el Río Cauca, lo cual afecta la dinámica del cauce y la estabilidad del Jarillón de protección contra inundaciones, por tanto, en este caso, el reemplazo de agregados finos por RV sería ideal para mitigar estos impactos [15].

En [12], [16]-[18] mostraron que la adición de RV al concreto mejora significativamente su resistencia y durabilidad. [19] demostró que el uso de vidrio reciclado en mezclas de arena y cal aumenta la resistencia a la compresión y reduce la densidad. [20] encontraron que la adición de vidrio triturado como reemplazo parcial de la arena en el concreto además de mejorar la resistencia, reduce la expansión de la reacción álcali-sílice. [11] en su trabajo realizaron concretos con reemplazo de arena por RV en porcentajes de 10 %, 20 % y 30 %, y compararon las resistencias a la compresión, tracción indirecta y flexión a los 7, 14 y 28 días de curado, con un concreto producido con 100 % de agregados naturales, y reportan incrementos en las resistencias (15 %) con respecto al concreto de referencia. Otros estudios han evaluado concretos con reemplazo de arena natural por vidrio reciclado (RV) en porcentajes de hasta 100 %, observando mejoras en propiedades mecánicas y durabilidad, así como beneficios ambientales en términos de consumo de energía y emisiones de CO₂ [10], [21].

Estos estudios sugieren que el vidrio usado puede ser un sustituto viable y beneficioso de la arena en materiales de construcción. Sin embargo, en el contexto del uso de residuos de vidrio como sustituto del agregado fino en mezclas de concreto, es crucial considerar el riesgo potencial de aparición de la reacción álcali-sílice (ASR). El vidrio tipo sódico-cálcico, común en residuos de envases, contiene una elevada proporción de sílice amorfa (~70 %) y óxidos de sodio y potasio, lo que lo convierte en un material potencialmente reactivo frente a los álcalis del cemento Portland. Cabe anotar que, la ASR se ve favorecida en ambientes con alta humedad y disponibilidad de portlandita (Ca(OH)₂) [22], [23], generando geles expansivos que pueden deteriorar la integridad del concreto [24]. Diversas estrategias han sido propuestas para mitigar este efecto, una de las más efectivas consiste en la reducción del tamaño de partícula del vidrio por debajo de las 300 µm, umbral en el cual este material puede exhibir comportamiento puzolánico al reaccionar con el Ca(OH)₂ antes de que se inicie la expansión [25]. Asimismo, la incorporación de materiales cementantes suplementarios (SCMs), como cenizas volantes, escoria de alto horno y humo de sílice, ha demostrado ser eficaz en la mitigación de la ASR, al reducir la alcalinidad del sistema y favorecer la estabilidad microestructural [26]. Para evaluar cuantitativamente la susceptibilidad a la ASR, es fundamental realizar ensayos específicos como los estandarizados por las normas ASTM C1260 y ASTM C1567. Estos métodos permiten detectar la reactividad potencial de los agregados y la eficacia de las combinaciones de materiales cementantes y agregados en la mitigación de la ASR. En consecuencia, es necesario advertir que, en condiciones de exposición a humedad y sin mecanismos de mitigación adecuados, la inclusión de vidrio como agregado podría implicar un riesgo potencial de deterioro por ASR.

Aunque en otros países se ha recomendado el uso de RV tanto como agregado grueso, agregado fino y/o adición suplementaria, en Colombia no existen documentos oficiales que proporcionen pautas para su uso, indicando la necesidad de estudiar su viabilidad técnica para motivar la aceptación industrial y una potencial normativa, contribuyendo a la sustentabilidad del sector. Además, esto permitiría reducir el impacto ambiental generado por los excesivos volúmenes de RV generados, ya que en Colombia anualmente se estima que solo se recicla alrededor de 120000 toneladas de vidrio, equivalentes a 500 millones de envases, cifra que no supera el 30 %, y por consiguiente el restante 70 % de residuos de vidrio es llevado a vertederos para disposición final.

Basado en lo anterior, el objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de reemplazar el agregado fino natural por RV en las propiedades de un concreto en estado fresco (asentamiento) y estado endurecido cuando es incorporado en porcentajes hasta del 40 % como reemplazo del agregado fino natural (AFN). Para ello, se determinaron la resistencia a compresión y flexión, la densidad y absorción, la conductividad y difusividad térmica, la capacidad aislante y la estabilidad a elevadas temperaturas. Finalmente se produjeron bloques

y se evaluaron sus características físico-mecánicas. Los resultados se compararon con los obtenidos en un concreto de referencia producido con 100 % AFN.

2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

2.1 Selección y caracterización de materiales

Para la producción de los concretos se utilizó como materias primas, cemento portland de uso general (UG), residuo de vidrio (RV) como sustituto parcial de la arena, arena natural y grava. La caracterización química del cemento se llevó a cabo mediante fluorescencia de rayos X (XRF), utilizando un espectrómetro modelo MagiX-Pro PW-2440 de la marca Phillips. A partir del análisis, se identificó que los principales componentes del cemento son: dióxido de silicio (SiO_2) 19,13 %, óxido de calcio (CaO) 57,70 %, óxido de aluminio (Al_2O_3) 4,42 % y óxido de hierro (Fe_2O_3) 4,32 %.

La Tabla 1 presenta las principales características de los agregados naturales (arena y grava) y el agregado de vidrio reciclado. Este último fue obtenido a partir de la trituración y posterior molienda de residuos de vidrio provenientes de botellas. Se destaca que la arena fabricada a partir de RV presenta bajos niveles de absorción de agua 0,20 % (ASTM C128), en comparación con la arena natural (AFN) y grava natural (AGN) que son de 1,30 % y 1,64 %, respectivamente. La baja capacidad de absorción del RV está directamente relacionada con su naturaleza impermeable, esta propiedad permite generar mezclas de concreto con mayor fluidez cuando se utilice vidrio triturado como agregado. El tamaño máximo del AGN fue de 25,4 mm, y los módulos de finura del RV y la arena natural fueron 3,35 y 2,75, respectivamente, clasificándolos como arena gruesa y media (ASTM C136); su distribución granulométrica se presenta en la Figura 1. El contenido de materia orgánica (ASTM C40) del RV fue el mínimo (placa orgánica No. 1), lo cual lo considera viable para su utilización en mezclas de morteros y/o concretos.

Tabla 1. Características de los agregados (finos y gruesos). Fuente: elaboración propia.

Características	Norma	Agregado fino		Agregado grueso (AGN)	
		De tipo natural (AFN)	Obtenido de residuo de vidrio (RV)	Norma	Resultado
		Resultado	Resultado		
Densidad (kg/m^3)	ASTM C128	2320	2430	ASTM C127	2610
Absorción (%)	ASTM C128	1,30	0,20	ASTM C127	1,64
Peso unitario (kg/m^3)	ASTM C29	1567	1412	ASTM C29	1732
Tamaño máximo (mm)		N/A		ASTM C136	19
Módulo de finura	ASTM C136	2,75	3,35		N/A
Impurezas orgánicas	ASTM C40	Placa orgánica No. 3	Placa orgánica No. 1		N/A

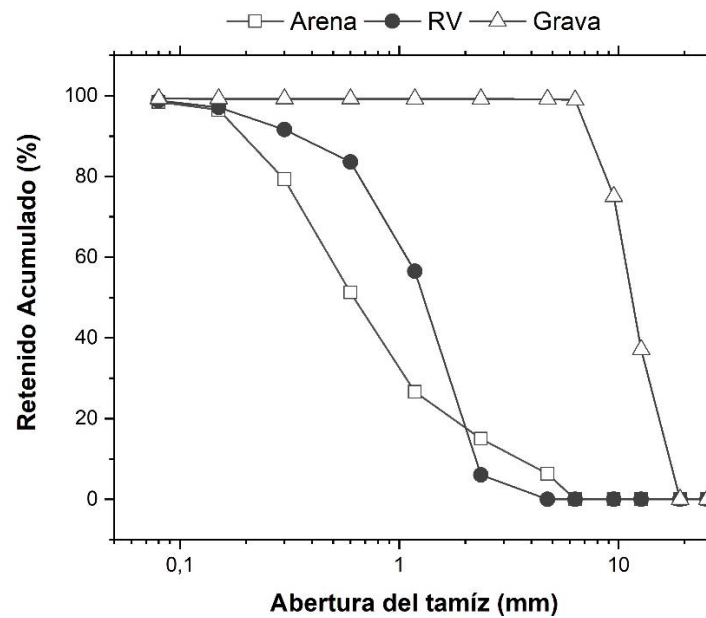


Figura 1. Distribución de tamaño de partícula de los agregados finos, RV y gruesos utilizados para la elaboración de los concretos en estudio. Fuente: elaboración propia.

2.2 Diseño de mezclas y producción de concretos

Los concretos se diseñaron con 400 kg/m^3 de cemento y una proporción de agregados grueso y fino del 40 % y 60 % respectivamente. Se prepararon 4 mezclas, la de referencia donde se utilizó 100 % agregados naturales y en las restantes se efectuó un reemplazo del agregado fino natural por RV en proporciones del 20 %, 30 % y 40 % (Tabla 2). La relación (a/c) utilizada fue de 0,5 para las diferentes mezclas. El curado se realizó a temperatura ambiente y humedad relativa mayor al 90 %.

Tabla 2. Proporcionamiento de las mezclas de concretos utilizando RV como remplazo de AFN (20 %, 30 %, y 40 %). Fuente: elaboración propia.

	OPC-100 % AGN	OPC-20 % RV	OPC-30 % RV	OPC-40 % RV
Agua	205	205	205	205
Cemento	410	410	410	410
AGN	717	717	717	717
AFN	905	724,01	633,51	543,01
RV	-	181,00	271,50	362,01

Para cada mezcla se evaluó el asentamiento en estado fresco, y en estado endurecido se evaluaron la resistencia a la compresión a 7, 28 y 90 días de curado utilizando especímenes cilíndricos de 76,2 mm de diámetro por 152,4 mm de alto y la resistencia a la flexión a edades de 28 días de curado en vigas de 310 x 80 x 80 mm. Adicionalmente se determinaron algunas propiedades físicas tales como la absorción y porosidad a edad de 28 días utilizando muestras cilíndricas de 76,2 mm de diámetro por 76,2 mm de alto, la conductividad térmica y el desempeño frente a fuego. Para este último ensayo se realizó la exposición a llama directa en placas de 150 x 150 x 40 mm para determinar su estabilidad y la transferencia de calor, además de la resistencia a la compresión de los concretos luego de ser sometidas las mezclas a temperaturas de 25°C, 300°C, 600°C y 900°C durante 120 minutos, empleando una velocidad de calentamiento de tres grados centígrados por minuto. A partir de los resultados obtenidos se seleccionó la mezcla óptima y se elaboraron bloques perforados de concreto, los cuales

fueron caracterizados físico-mecánicamente de acuerdo con lo establecido en la norma ASTM C140. En todos los casos, los datos reportados en los ensayos físicos y mecánicos corresponden al promedio de un mínimo de tres probetas.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Propiedades en estado fresco de los concretos

Con el objetivo de analizar la capacidad de deformación de las mezclas de concreto en estado fresco bajo su propio peso, se realizó el ensayo de asentamiento utilizando el cono de Abrams (ver Tabla 3). En términos generales, las mezclas que incorporaron residuos de vidrio mostraron una trabajabilidad superior (asentamiento ≥ 150 mm), manteniendo una cohesión adecuada entre sus componentes y sin evidenciar segregación ni exudación. Se aprecia que el asentamiento de los concretos incrementa a medida que aumenta el porcentaje de vidrio en la mezcla, lo cual concuerda con lo reportado por [14], [27] y se considera está relacionado con la baja absorción del vidrio comparada a la de la arena natural; en el mismo sentido, otros autores que han incorporado residuos de vidrio, provenientes de diversas fuentes (vidrio de parabrisas, pantallas de cristal líquido, entre otras), como reemplazo del agregado fino natural en ordenes de hasta un 100 % reportan incrementos del asentamiento hasta del 85 % [28], [29]. En contraste, algunos estudios afirman que la inclusión del residuo de vidrio como agregado fino en el concreto reduce la trabajabilidad; esta disminución se ha atribuido a la forma angular con bordes afilados de las partículas de vidrio [11]. [2] sustituyó en proporciones del 20 % al 80 % el agregado fino natural por residuos de vidrio obtenidos de pantallas de cristal líquido y reporta disminuciones del asentamiento hasta del 26 %; [30] utilizaron vidrio de parabrisas reciclado y reportan 11 % de reducción en el asentamiento al reemplazar el 80 % del agregado fino natural. Acorde a lo anterior, [13] recomienda un reemplazo máximo del 20 % para lograr una buena trabajabilidad. En el presente estudio, aun con un 40 % de RV se logran incrementos de la trabajabilidad en la mezcla del 69 %.

Tabla 3. Resultados del ensayo de asentamiento (slump) para los concretos. Fuente: elaboración propia.



Mezcla	Asentamiento (mm)
OPC-100 % AGN	124
OPC-20 % RV	150
OPC-30 % RV	165
OPC-40 % RV	210

3.2 Propiedades mecánicas de los concretos

La evolución de la resistencia a la compresión a edades hasta de 90 días de curado para los diferentes concretos se puede observar en la Figura 2. En todas las mezclas analizadas se observa una tendencia creciente en la resistencia a la compresión a medida que avanza el tiempo de curado, lo cual es un comportamiento típico de los concretos elaborados con OPC. El reemplazo de AFN por RV hasta una proporción del 30 % no afecta de manera significativa los resultados de la resistencia a la compresión e incluso a porcentajes del 20 % se observa un leve incremento a todas las edades evaluadas; así a los 90 días se obtuvo un aumento del 11 % para la mezcla OPC-20 %RV (36 MPa), con respecto al concreto de referencia [8], [31]. Sin embargo, cuando el remplazo es de un 40 % la tendencia observada es a la disminución de la resistencia, esto ha sido atribuido a la falta de rugosidad del vidrio lo que perjudica la cohesión de la pasta [32].

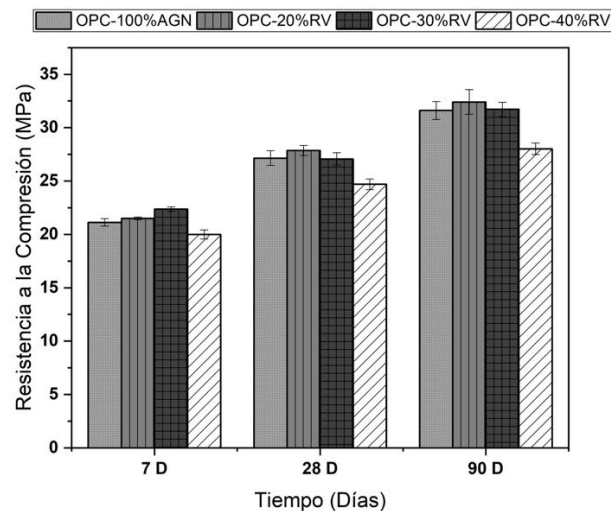


Figura 2. Resistencia a la compresión de los concretos en función de los tiempos de curado.
Fuente: elaboración propia.

Resultados similares a los reportados en el presente estudio se obtuvieron en una investigación de la Universidad de James Cook, en Australia, en donde se usaron reemplazos de AFN por RV hasta en un 60 %, y se reporta que un 20 % de agregado de vidrio podría ser óptimo para aumentar la resistencia a la compresión del concreto en 5,8 % a los siete días y del 7 % a los 28 días [12]. Adicionalmente afirman que porcentajes superiores reducen significativamente la resistencia y lo atribuyen a la débil adherencia entre el vidrio y la pasta de cemento, que da lugar a una zona de transición interfacial débil, y a medida que la proporción de RV incrementa la presencia de grietas y poros aumenta en la matriz de concreto generando disminución de la resistencia [12]. [33] evaluaron mezclas con reemplazo de agregado grueso y fino por vidrio en porcentajes del 10 % al 50 % y expresan que el uso de vidrio triturado como agregado grueso afecta la resistencia a la compresión del hormigón en mayor grado que cuando se usa como reemplazo de agregado fino, aun así, recomiendan reemplazar máximo un 20 % del agregado fino o grueso con desecho de vidrio. Sin embargo, otros estudios han reportado un incremento resistente, y lo atribuyen a una reacción superficial de la pasta de cemento con la superficie del vidrio de carácter puzolánico, [34] reportan con un reemplazo del agregado fino del 100 % incrementos del 20 % en la resistencia a compresión. En la Figura 3 se presenta el modo de falla de los concretos en el ensayo de resistencia a compresión a edad de 28 días de curado, en todos los casos es tipo 4 acorde a la norma NTC 673.

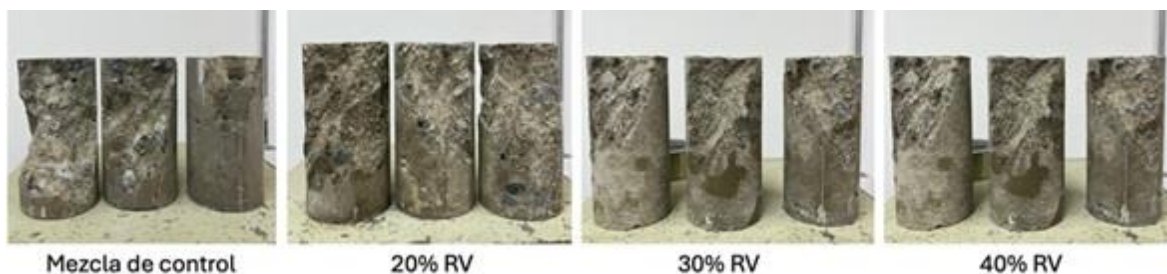


Figura 3. Falla de los concretos a 28 días de curado. Fuente: elaboración propia.

La resistencia a la flexión de los concretos con sustitución del agregado fino por RV a los 28 días de curado se presenta en la Figura 4. Se evidencia un decrecimiento en la resistencia a medida que aumenta el contenido de RV en las mezclas, esta misma tendencia ha sido reportada en diferentes estudios. En [35], [36] se realizaron reemplazos del agregado grueso y el agregado fino por RV obteniendo una disminución en la resistencia a la flexión en ambos

casos. En [37] concluyeron que hasta un 15 % RV como reemplazo del agregado natural no afecta la resistencia a la flexión del concreto. Sin embargo, en el mismo estudio, cuando se utilizó un 25 %, la resistencia a la flexión disminuyó en un 25 % y 46 % después de 7 y 28 días de curado, respectivamente. Esta reducción de la resistencia probablemente se debe a la menor fuerza de unión entre la superficie lisa de las partículas de vidrio y la pasta de cemento [38]. Resultados contrarios a lo expuesto son relativamente escasos, sin embargo se encuentran reportes que señalan incrementos en la resistencia a flexión hasta de un 15 % con reemplazos de hasta el 20 % [9].

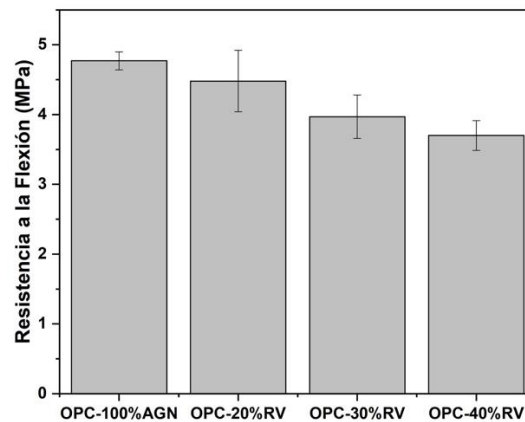


Figura 4. Resistencia a la flexión de los concretos con diferentes porcentajes (%) de reemplazo del agregado fino natural por RV. Fuente: elaboración propia.

3.3 Propiedades físicas: densidad, absorción y porosidad

Los resultados correspondientes a la densidad, absorción y volumen de poros permeables de los concretos determinados conforme a la norma ASTM C642, se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4. Propiedades físicas de los concretos. Fuente: elaboración propia.

Tipo de mezcla	Absorción después de inmersión (%)	Densidad aparente (kg/m ³)	Volumen de vacíos (%)
OPC-100 % AGN	6,71	2490	14,70
OPC-20 % RV	5,81	2520	13,18
OPC-30 % RV	5,55	2540	12,76
OPC-40 % RV	5,17	2560	12,04

En términos generales, las densidades aparentes obtenidas son comparables con las de concretos tradicionales fabricados con agregados silíceos, los cuales suelen presentar rangos entre 2300 kg/m³, y 2600 kg/m³, según lo reportado en estudios previos [39]. Así mismo, no se aprecian diferencias significativas en la densidad de los concretos a 28 días de curado (≤ 6 %); sin embargo, el leve incremento es atribuible a la mayor densidad de RV, tal como se reportó en la Tabla 1. Se observa una disminución en la absorción de agua y en la porosidad de los concretos a medida que se aumenta el contenido de RV en los concretos, logrando disminuir hasta en un 23 % la absorción de agua y el contenido de poros en un 19 %. Este comportamiento en los concretos puede estar relacionado a las partículas más finas que contenía RV, las cuales pueden actuar como puzolanas o fillers, generando modificaciones en la matriz y haciendo que la estructura porosa de la mezcla sea más homogénea, y los poros más pequeños [3], [27], [40]. Por tanto, al tener una menor porosidad disminuye la absorción de agua en el concreto, y a su vez, el volumen de vacíos en la muestra. De otra parte, la disminución en la absorción de agua a medida que aumenta la proporción de RV en la mezcla se puede igualmente atribuir a la

naturaleza impermeable del vidrio, en comparación con los agregados naturales como la arena y la grava [3], [27], [38].

3.4 Propiedades térmicas

3.4.1 Conductividad y difusividad térmica

En la Tabla 5 se presentan los resultados correspondientes a la conductividad térmica, difusividad térmica y calor específico de los concretos con y sin reemplazo del AFN. En general, se aprecia una disminución de la conductividad térmica en los concretos con RV comparados al concreto de referencia (100 % AFN), la cual es del 9,3 %, 18,1 % y 19,0 % para el concreto con 20 %, 30 % y 40 % RV, respectivamente, esta reducción es atribuible a la naturaleza aislante del vidrio. [40], [41] reportan también una disminución de la conductividad térmica en mezclas de mortero con reemplazo de vidrio, lo cual atribuyen a la menor conductividad térmica que posee el vidrio a comparación de la arena natural silícea. La tendencia observada en la conductividad térmica se mantiene para la difusividad y calor específico de los concretos (Tabla 5). Así, a mayor contenido de reemplazo de RV, los concretos presentan una tendencia a disminuir la difusividad térmica, lo cual indica que la velocidad con la que se propaga el calor dentro de la mezcla es menor, y esto es debido a que la incorporación de vidrio en la mezcla proporciona una mayor capacidad de aislamiento al material.

Tabla 5. Resultado de análisis de propiedades térmicas. Fuente: elaboración propia.

Tipo de muestra	Conductividad térmica (W/mK)	Difusividad térmica (mm ² /s)	Calor específico (MJ/mm ³ K)
OPC-100 % AGN	1,843	0,933	2,013
OPC-20 % RV	1,672	0,864	1,978
OPC-30 % RV	1,509	0,831	1,957
OPC-40 % RV	1,492	0,754	1,783

3.4.2 Ensayo de exposición a llama directa

En este ensayo se registraron las temperaturas para cada placa en la cara de aplicación de la llama y en la cara opuesta, los resultados se incluyen en la Figura 5.

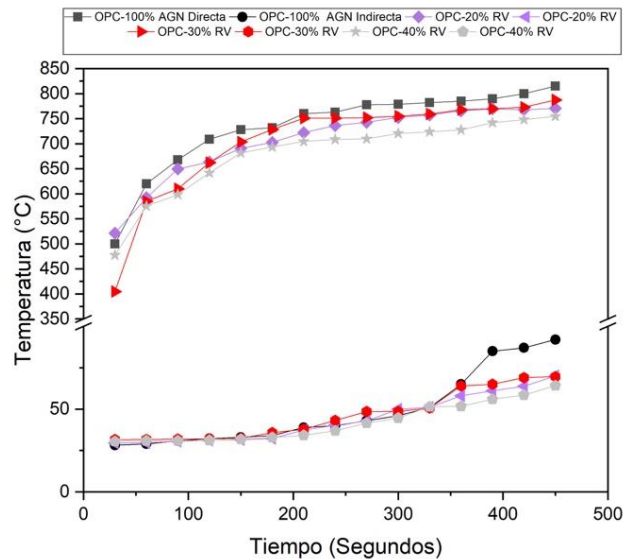


Figura 5. Curvas de temperatura medidas en los concretos expuestas al fuego directo. Fuente: elaboración propia.

El ensayo se realizó durante 8 minutos. Durante los primeros cuatro minutos del ensayo térmico, los concretos experimentan una fase de calentamiento inicial. Posteriormente, se alcanza una etapa de estabilización térmica en la superficie expuesta, registrándose temperaturas aproximadas de 770°C para la mezcla OPC con 20 % de RV, 787°C para la de 30 % y 754°C para la de 40 % de RV, mientras que en el concreto OPC-100 % AGN las temperaturas registradas son en promedio 815°C. De manera paralela, en la cara opuesta a la exposición, se obtuvo la mayor temperatura en la mezcla patrón y la menor en la mezcla de 40 % de reemplazo de vidrio, siendo 65°C y 51°C, respectivamente.

A partir de los valores de conductividad térmica presentados en la Tabla 5 y las temperaturas registradas durante la exposición a fuego directo, se estimó el flujo de calor mediante (1) para los concretos con incorporación de RV y para el concreto de referencia, como se ilustra en la Figura 6. En la ecuación, K representa la conductividad térmica (W/mK), A es el área expuesta (m²), ΔT (°C) es la diferencia de temperaturas entre la cara frontal y posterior, y E es el espesor de la muestra (m).

$$Q = KA \frac{\Delta T}{E} \quad (1)$$

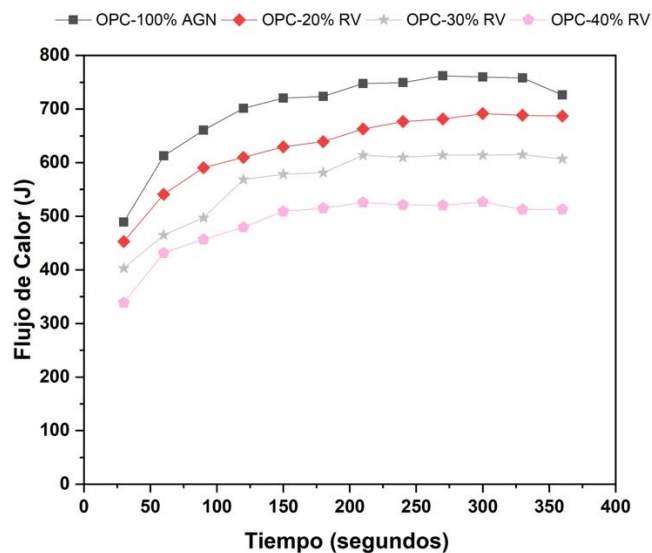


Figura 6. Tráferencia de calor de los concretos con diferentes % RV en exposición directa al fuego.
Fuente: elaboración propia.

De los resultados de flujo de calor se pueden resaltar dos etapas; la primera etapa va desde el tiempo inicial hasta los dos minutos aproximadamente, donde se nota el incremento rápido de la temperatura. En la segunda etapa, la transferencia de calor baja y se considera que la temperatura tiende a estabilizarse. Esto quiere decir que el concreto no continúa incrementando su temperatura significativamente, sino que aumenta lentamente a través del tiempo de exposición. Se aprecia que a medida que aumenta el reemplazo del AGN por RV en el concreto, el flujo de calor es menor, por tanto, la cara indirecta tomará más tiempo en llegar a una alta temperatura. A mayor contenido de vidrio en la mezcla, la transferencia de calor es menor, resultados similares obtuvieron [42], quienes lo atribuyen a la baja capacidad de conducción térmica que posee el vidrio.

3.5 Resistencia a compresión de especímenes expuestos a altas temperaturas

El concreto es un material incombustible, pero al estar sometido a condiciones de temperatura superiores a su límite de servicio, sus propiedades se ven afectadas, esto significa

que, aunque su apariencia permanezca inalterada, no así sus propiedades. El efecto de la temperatura sobre la resistencia a la compresión de los concretos elaborados con RV en proporciones de reemplazo del 20 %, 30 % y 40 % y el concreto 100 % AFN en el rango de 25°C a 900°C se muestra en la Figura 7. Se aprecia que, a medida que la temperatura aplicada aumenta, la resistencia del concreto disminuye para todas las mezclas, esto se debe a que además de la pérdida de humedad, se inicia el proceso de descomposición de los diferentes productos de hidratación y en consecuencia se aumenta la porosidad y esto afecta negativamente la resistencia mecánica. No obstante, para una misma temperatura, se obtiene una mayor resistencia a la compresión entre mayor sea el contenido de vidrio presente en la mezcla. A 300°C, la resistencia residual en los concretos OPC-100 % AGN, OPC-20 % RV, OPC-30 % RV y OPC-40 %RV es un 75 %, 78 %, 82 % y 89 % de los valores de resistencia a compresión obtenidos a temperatura de 25°C, respectivamente. La reducción de la resistencia observada a 300°C se atribuye principalmente a la evaporación del agua de los poros capilares (25–105°C) y la deshidratación de la etringita (105–300°C) [43], [44]. A temperatura entre 300°C y 400°C se produce la remoción del agua combinada presente en los geles iniciando la descomposición del silicato de calcio hidratado (gel CSH); entre 450°C y 550°C ocurre la descomposición de la portlandita, por lo cual a partir de los 600°C se presenta una disminución significativa en la resistencia (Figura 7). En la muestra OPC-100 % AGN a 600°C la pérdida resistente fue del 48 % mientras para los concretos que contenían RV la pérdida es menor (un 16 % al utilizar 40 %RV). A temperaturas cercanas a los 800°C se produce la descarbonización del carbonato de calcio (adición presente en el cemento utilizado). Todos estos efectos generan a los 900°C una pérdida de resistencia elevada [44], [45].

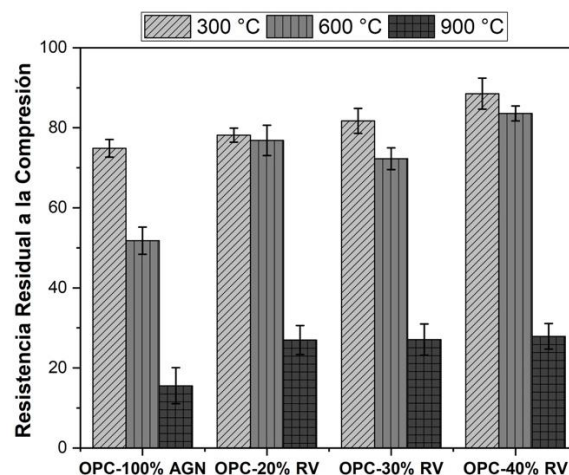


Figura 7. Efecto de la temperatura en la resistencia a la compresión de los concretos.
Fuente: elaboración propia.

A la temperatura de 900°C, la resistencia a la compresión de los tres tipos de concretos que contenían RV converge a valores muy cercanos. Esto podría atribuirse a la aproximación del vidrio a su umbral de fusión (700–800°C para el vidrio sódico-cálcico), donde la microestructura del vidrio sufre transformaciones físicas y mecánicas. Estas transformaciones en las proximidades de los 800°C provocan el ablandamiento del vidrio introducido en la mezcla. [27] evaluó el efecto de RV como agregado fino en las propiedades mecánicas del concreto a temperaturas elevadas, y reporta que independientemente del contenido y tamaño de RV, todos los concretos alcanzaron un valor similar después del tratamiento térmico a 700°C, debido al efecto inducido de ablandamiento del vidrio a esta temperatura; en el mismo sentido otros estudios [27], [41], [46], [47], presentaron resultados experimentales similares. [38], [48] observaron resistencias residuales más altas para el hormigón con agregado de vidrio fino, atribuyéndolo a la fusión y resolidificación de RV, el cual en estado fundido puede rellenar las

grietas y durante el proceso de endurecimiento mejorar la microestructura. La similitud en el comportamiento de las mezclas con RV a 900°C observada en la Figura 7 podría, por lo tanto, atribuirse a la eliminación del efecto del tamaño de partícula en el estado ablandado de los agregados de vidrio. Cabe anotar que los especímenes de concreto se enfrían a temperatura ambiente antes del ensayo mecánico, y debido a que el vidrio exhibe una transición desde su forma más blanda y viscosa a su estado sólido alrededor de 380°C, es posible que este efecto densifique la matriz. Esta transición del vidrio se conoce como inversión α a β , donde el polimorfo β se caracteriza por una forma “similar a una aguja” que tiene mejor tenacidad, resistencia y resistencia a la fatiga [44].

Aunque en este estudio no se realizó una evaluación experimental específica de la reacción álcali-sílice (ASR), no se observaron evidencias visuales de deterioro por expansión en las mezclas evaluadas, incluso tras la exposición a altas temperaturas. Cabe destacar que la granulometría del residuo de vidrio utilizado mostró una distribución de tamaños donde una fracción significativa de partículas se encuentra por debajo de los 300 μm , umbral por debajo del cual diversos autores han reportado una notable reducción de la reactividad álcali-sílice. Estos resultados coinciden parcialmente con lo reportado por [13] y [25], quienes señalaron que la ASR puede mitigarse significativamente cuando el vidrio utilizado posee una granulometría fina, preferiblemente inferior a 300 μm . Sin embargo, dado que el material empleado en este estudio también contiene partículas de mayor tamaño, no puede descartarse totalmente la posibilidad de reactividad en condiciones ambientales propicias (alta humedad, disponibilidad de álcalis). Estudios como los de [7] y [22] advierten que la presencia de partículas gruesas de vidrio incrementa el riesgo de expansión por ASR si no se implementan mecanismos de mitigación complementarios, como el uso de materiales cementantes suplementarios. Por tanto, se recomienda incorporar en futuros trabajos ensayos normalizados como ASTM C1260 o C1567, que permitan determinar cuantitativamente la reactividad potencial del RV y su estabilidad a largo plazo en condiciones reales de exposición.

3.6 Producción y caracterización de un elemento constructivo (tipo bloque perforado)

Con base en los resultados obtenidos en los diferentes ensayos, se seleccionó la mezcla de concreto con remplazo de vidrio del 40 % para la elaboración de bloques perforados de concreto (Figura 8); en los cuales se evaluó la absorción, densidad y contenido de humedad, según los lineamientos de la norma NTC 4026.



Figura 8. Bloques perforados de concretos fabricados con RV del 40 %. Fuente: elaboración propia.

Los resultados de resistencia a la compresión se muestran en la Tabla 6, donde se evidencia que cumplen con la resistencia necesaria para ser clasificados como bloques estructurales de alta resistencia. La resistencia del bloque con 40 % de RV es superior en un 4,2 % a la del bloque de referencia (100 % OPC), en cuanto a la absorción los resultados son similares. En general, el

bloque diseñado con 40 % de reemplazo de agregado fino por residuo de vidrio cumple con las especificaciones de la norma para uso estructural.

Tabla 6. Propiedades obtenidas (NTC 4026) para bloques a 28 días de curado.
Fuente: elaboración propia.

Resistencia a la compresión a los 28 días evaluada sobre el área neta promedio		Absorción de agua % según el peso (densidad) del concreto secado en horno, kg/m ³	
Mínimo, MPa		Promedio de 3 unidades, máximo, %	
Clase Alta	Promedio de 3 unidades	Peso normal kg/m ³	Absorción de agua %
NTC 4026	13,00	2000 o más	9,00
OPC-100 % AGN	15,56	2160	7,75
OPC-40 %RV	16,24	2299	7,43

4. CONCLUSIONES

El uso de vidrio reciclado como agregado fino en el concreto se presenta como una alternativa viable y sostenible, cumpliendo con diversas normativas y ofreciendo beneficios significativos en el ámbito de la construcción. En el presente estudio se mostró que la inclusión de hasta un 40 % de vidrio triturado como remplazo del agregado fino en la mezcla de concreto da lugar a un incremento de la resistencia a compresión del 11 % comparada a la reportada para el concreto de referencia. De otra parte, también mejora las propiedades físicas (densidad, absorción y porosidad) y el comportamiento térmico del concreto disminuyendo la transferencia de calor, lo cual se espera contribuya a la eficiencia bioclimática al utilizar los elementos estructurales producidos.

En general, la incorporación de RV mejora la trabajabilidad del concreto hasta en un 69 %, reduce la absorción en un 23 % y la porosidad en un 19 %. Además, las propiedades conductividad y difusividad térmica disminuyeron hasta un 19 % al emplear un 40 % de RV, a la par que la resistencia a la compresión no presenta afectación significativa a altas temperaturas. Sin embargo, se observó una reducción en la resistencia a flexión de los concretos con RV (reducción de hasta un 24,38 %), que podría ser mitigada mediante el uso de fibras. Los bloques producidos a partir de la mezcla que incorpora 40 % RV como reemplazo de AFN presentan características físico-mecánicas (RC de 16,24 MPa y % de absorción de 7,43 %) que satisfacen las normas vigentes y permite su clasificación como bloques estructurales de clase alta.

Acorde a estos resultados, el uso del vidrio reciclado, además de reducir la dependencia de agregados naturales (arena), impulsa la economía circular y disminuye el impacto ambiental. Estos resultados pueden promover la implementación del uso de residuos de vidrio en reemplazo de los agregados finos, en particular en aquellos casos donde las arenas son extraídas de río generando un elevado impacto ambiental al afectar al ecosistema. De otra parte, la utilización de RV favorece la construcción de infraestructuras más sostenibles y eficientes.

Cabe aclarar que, el presente estudio se enfocó en las propiedades físico-mecánicas y térmicas del concreto con residuo de vidrio, por tanto, no se abordaron variables relacionadas con la durabilidad, como la penetración de cloruros, carbonatación y/o ataque por sulfatos. Se recomienda estudiar especialmente las posibles reacciones álcali-sílice (ASR) que puedan generarse debido a la presencia de RV en la mezcla, lo cual afectaría notablemente el desempeño del material en servicio. Estas propiedades serán consideradas en estudios futuros, al igual que la evaluación de la resistencia a flexión a edades superiores a los 28 días, con el fin de ampliar la comprensión del desempeño a largo plazo de estas mezclas.

5. AGRADECIMIENTO Y FINANCIACIÓN

Los autores miembros del Grupo de Investigación Materiales Compuestos (CENM) agradecen a la Universidad del Valle (Cali) por el apoyo para la realización de este trabajo.

6. REFERENCIAS

- [1] G. Habert et al., "Environmental impacts and decarbonization strategies in the cement and concrete industries," *Nat. Rev. Earth Environ.*, vol. 1, no. 11, pp. 559-573, Nov. 2020. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0093-3>
- [2] S. Qaidi et al., "Concrete Containing Waste Glass as an Environmentally Friendly Aggregate: A Review on Fresh and Mechanical Characteristics," *Materials*, vol. 15, no. 18, p. 6222, Jan. 2022. <https://doi.org/10.3390/ma15186222>
- [3] I. Mallum, A. R. Mohd.Sam, N. H. A. Shukor Lim, and N. Omolayo, "Sustainable Utilization of Waste Glass in Concrete: A Review," *Silicon*, vol. 14, no. 7, pp. 3199-3214, May. 2022. <https://doi.org/10.1007/s12633-021-01152-x>
- [4] B. Geeta, and A. Saleem, "The Use of Natural Organic Fibres in Cement Concrete: A Review," *Inter. Res. J. Engin. Technol.*, vol. 8, no. 6, pp. 950-952, Jun. 2021. https://www.academia.edu/download/68643198/IRJET_V8I6I73.pdf
- [5] B. Geeta, and A. Saleem, "Concrete Using Agricultural Waste and Egg Shell Powder Waste: A Review," *Inter. Res. J. Engin. Technol.*, vol. 8, no. 6, pp. 947-949, Jun. 2021. https://www.academia.edu/download/68643200/IRJET_V8I6I72.pdf
- [6] SSPD, "Informe Nacional de Disposición Final de Residuos Sólidos 2021," Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, 2021. [Online]. Available: <https://www.superservicios.gov.co/sites/default/files/inline-files/Informe-Nacional-de-Disposicion-Final-de-Residuos-Solidos.pdf.pdf>
- [7] Ministerio de Ambiente, "Hoy no se habla de basura, sino de residuos que son insumos para productos: Minambiente," [minambiente.gov.co](https://www.minambiente.gov.co), Accessed: Aug. 6, 2024. [Online]. Available: <https://www.minambiente.gov.co/hoy-no-se-habla-de-basura-sino-de-residuos-que-son-insumos-para-productos-minambiente/>
- [8] H. Eu et al., "Alkali-Silica Reaction and Residual Mechanical Properties of High-Strength Mortar Containing Waste Glass Fine Aggregate and Supplementary Cementitious Materials," *Int. J. Concr. Struct. Mater.*, vol. 18, no. 1, p. 69, Oct. 2024. <https://doi.org/10.1186/s40069-024-00711-x>
- [9] S. Abdallah, and M. Fan, "Characteristics of concrete with waste glass as fine aggregate replacement," *Int. J. Eng. Tech. Res.*, vol. 2, no. 6, pp. 11-17, Jun. 2014. https://www.erpublication.org/published_paper/IJETRO21927.pdf
- [10] Md. N. Newaz Khan, and P. Kumar Sarker, "Effect of waste glass fine aggregate on the strength, durability and high temperature resistance of alkali-activated fly ash and GGBFS blended mortar," *Constr. Build. Mater.*, vol. 263, p. 120177, Dec. 2020. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061820321826>
- [11] S. Arivalagan, and V. S. 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.*, vol. 45, Part 7, pp. 6035-6041, Jan. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.722>
- [12] N. Tamanna, R. Tuladhar, and N. Sivakugan, "Performance of recycled waste glass sand as partial replacement of sand in concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 239, p. 117804, Apr. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117804>
- [13] A. M. Rashad, "Recycled waste glass as fine aggregate replacement in cementitious materials based on Portland cement," *Constr. Build. Mater.*, vol. 72, pp. 340-357, Dec. 2014. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.08.092>
- [14] B. V. Kavyateja, P. Narasimha Reddy, and U. Vamsi Mohan, "Study of strength characteristics of crushed glass used as fine aggregate in concrete," *Int. J. Res. Eng. Technol.*, vol. 5, no. 2, pp. 157-160, Feb. 2016. <https://doi.org/10.15623/ijret.2016.0502027>
- [15] I. Herrera Briñez, "Por extracción ilegal de arena del río cauca, cuatro personas fueron capturadas," Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca, 2025. [Online]. Available: https://www.cvc.gov.co/carousel/1636-ilegal-extra-2015?utm_source=chatgpt.com

- [16] S. Can Bostanci, M. Limbachiya, and H. Kew, "Portland-composite and composite cement concretes made with coarse recycled and recycled glass sand aggregates: Engineering and durability properties," *Constr. Build. Mater.*, vol. 128, pp. 324-340, Dec. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.10.095>
- [17] A. Hajimohammadi, T. Ngo, and A. Kashani, "Glass waste versus sand as aggregates: The characteristics of the evolving geopolymer binders," *J. Clean. Prod.*, vol. 193, pp. 593-603, Aug. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.086>
- [18] M. Seddik Meddah, "Use of Waste Window Glass as Substitute of Natural Sand in Concrete Production," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 603, no. 3, p. 032011, Sep. 2019. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/603/3/032011>
- [19] K. Borek, P. Czapik, and R. Dachowski, "Recycled Glass as a Substitute for Quartz Sand in Silicate Products," *Materials*, vol. 13, no. 5, p. 1030, Feb. 2020. <https://doi.org/10.3390/ma13051030>
- [20] CH. Srinivas, M. Srivalli, P. Upendra, E. Ahmad, and M. Kumar, "Utilization of Recycled Glass Waste as Partial Replacement of Fine Aggregate in Concrete," *Inter. J. Sci. Res. Eng. Manag.*, vol. 9, Mar. 2025. <https://doi.org/10.55041/IJSREM42825>
- [21] L. Si Ho, and T. -P. Huynh, "Recycled waste medical glass as a fine aggregate replacement in low environmental impact concrete: Effects on long-term strength and durability performance," *J. Clean. Prod.*, vol. 368, p. 133144, Sep. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133144>
- [22] O. D. Olajide, M. R. Nokken, and L. F. M. Sánchez, "Alkali-Silica Reactions: Literature Review on the Influence of Moisture and Temperature and the Knowledge Gap," *Materials*, vol. 17, no. 1, p. 10, Dec. 2023. <https://doi.org/10.3390/ma17010010>
- [23] M. Ranger, M. Tange Hasholt, J. Lindgård, and R. A. Barbosa, "Laboratory and field investigations of alkali-silica reaction prevention by supplementary cementitious materials: Influence of the free alkali loading," *Constr. Build. Mater.*, vol. 442, p. 137599, Sep. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137599>
- [24] O. Omar, H. Al Hatailah, and A. Nanni, "Advances and Perspectives in Alkali-Silica Reaction (ASR) Testing: A Critical Review of Reactivity and Mitigation Assessments," *Designs*, vol. 9, no. 3, p. 71, Jun. 2025. <https://doi.org/10.3390/designs9030071>
- [25] G. Ke, W. Li, R. Li, Y. Li, and G. Wang, "Mitigation Effect of Waste Glass Powders on Alkali-Silica Reaction (ASR) Expansion in Cementitious Composite," *Int. J. Concr. Struct. Mater.*, vol. 12, no. 1, p. 67, Nov. 2018. <https://doi.org/10.1186/s40069-018-0299-7>
- [26] A. Hasan Mahmood, S. Afroz, A. Kashani, T. Kim, and S. J. Foster, "The efficiency of recycled glass powder in mitigating the alkali-silica reaction induced by recycled glass aggregate in cementitious mortars," *Mater. Struct.*, vol. 55, no. 6, pp. 1-20, Jul. 2022. <https://doi.org/10.1617/s11527-022-01989-7>
- [27] S. Li et al., "Properties of concrete with waste glass after exposure to elevated temperatures," *J. Build. Eng.*, vol. 57, p. 104822, Oct. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104822>
- [28] E. Emam Ali, and S. H. Al-Tersawy, "Recycled glass as a partial replacement for fine aggregate in self compacting concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 35, pp. 785-791, Oct. 2012. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.117>
- [29] T. Liu, H. Wei, D. Zou, A. Zhou, and H. Jian, "Utilization of waste cathode ray tube funnel glass for ultra-high performance concrete," *J. Clean. Prod.*, vol. 249, p. 119333, Mar. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119333>
- [30] N. Arabi, H. Meftah, H. Amara, O. Kebaili, and L. Berredjem, "Valorization of recycled materials in development of self-compacting concrete: Mixing recycled concrete aggregates – Windshield waste glass aggregates," *Constr. Build. Mater.*, vol. 209, pp. 364-376, Jun. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.024>
- [31] Z. Liu, C. Shi, Q. Shi, X. Tan, and W. Meng, "Recycling waste glass aggregate in concrete: Mitigation of alkali-silica reaction (ASR) by carbonation curing," *J. Clean. Prod.*, vol. 370, p. 133545, Oct. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133545>
- [32] P. Rajagopalan, V. Balaji, N. Unnikrishnan, T. Jainul Haq, and P. Bhuvaneshwari, "Study of Bond Characteristics of Reinforced Waste Glass Aggregate Concrete," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 80, no. 1, p. 012006, Jul. 2017. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/80/1/012006>
- [33] A. İ. Çelik et al., "Mechanical Behavior of Crushed Waste Glass as Replacement of Aggregates," *Materials*, vol. 15, no. 22, p. 8093, Jan. 2022. <https://doi.org/10.3390/ma15228093>
- [34] Y. Jiao, Y. Zhang, M. Guo, L. Zhang, H. Ning, and S. Liu, "Mechanical and fracture properties of ultra-high performance concrete (UHPC) containing waste glass sand as partial replacement material," *J. Clean. Prod.*, vol. 277, p. 123501, Dec. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123501>

- [35] E. Y. Mundaca Zavaleta, "Mejoramiento de propiedades físico-mecánicas del concreto $f'c = 210$ kg/cm² con adición de vidrio y caucho reciclado, Lima – 2022," Tesis de grado, Universidad César Vallejo, Lima, Perú, 2022. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/112989>
- [36] T. Drzymała, B. Zegardło, and P. Tofilo, "Properties of Concrete Containing Recycled Glass Aggregates Produced of Exploded Lighting Materials," *Materials*, vol. 13, no. 1, p. 226, Jan. 2020. <https://doi.org/10.3390/ma13010226>
- [37] A. W. Otunyo, and B. N. Okechukwu, "Performance of concrete with partial replacement of fine aggregates with crushed waste glass," *Niger. J. Technol.*, vol. 36, no. 2, pp. 403-410, Apr. 2017. <https://www.nijotech.com/index.php/nijotech/article/view/1288>
- [38] T. -C. Ling and C. -S. Poon, "Feasible use of recycled CRT funnel glass as heavyweight fine aggregate in barite concrete," *J. Clean. Prod.*, vol. 33, pp. 42-49, Sep. 2012. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.05.003>
- [39] P. C. Hewlett, and M. Liska, *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*, 5th ed, Oxford, U.K.: Butterworth-Heinemann, Elsevier, 2019. <https://doi.org/10.1016/C2013-0-19325-7>
- [40] P. Sikora, E. Horszczaruk, K. Skoczylas, and T. Rucinska, "Thermal properties of cement mortars containing waste glass aggregate and nanosilica," *Procedia Eng.*, vol. 196, pp. 159-166, Jun. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.07.186>
- [41] B. Wen, H. Wang, G. Gao, L. Zhang, Y. Kang, and F. Zhang, "The effect of waste glass incorporation on the high-temperature resistance of cement-based concrete," *Arch. Civ. Mech. Eng.*, vol. 25, no. 156, pp. 1-33, May. 2025. <https://doi.org/10.1007/s43452-025-01206-6>
- [42] Y. S. Al Rjoub, and M. F. Tamimi, "Heat transfer and thermal shock of recycled glass concrete," *Mag. Civ. Engin.*, vol. 91, no. 7, pp. 27-38, 2019. [https://engstroy.spbstu.ru/userfiles/files/2019/7\(91\)/03.pdf](https://engstroy.spbstu.ru/userfiles/files/2019/7(91)/03.pdf)
- [43] G. A. Khoury, "Compressive strength of concrete at high temperatures: a reassessment," *Mag. Concr. Res.*, vol. 44, no. 161, pp. 291-309, Dec. 2015. <https://doi.org/10.1680/mac.1992.44.161.291>
- [44] L. Tung-Chai, P. Chi-Sun, and K. Shi-Cong, "Influence of recycled glass content and curing conditions on the properties of self-compacting concrete after exposure to elevated temperatures," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 34, no. 2, pp. 265-272, Feb. 2012. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.08.010>
- [45] M. J. Terro, "Properties of concrete made with recycled crushed glass at elevated temperatures," *Build. Environ.*, vol. 41, no. 5, pp. 633-639, May 2006. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.02.018>
- [46] Z. Pan, Z. Tao, T. Murphy, and R. Wuhler, "High temperature performance of mortars containing fine glass powders," *J. Clean. Prod.*, vol. 162, pp. 16-26, Sep. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.003>
- [47] S. Yang, T. -C. Ling, H. Cui, and C. Sun Poon, "Influence of particle size of glass aggregates on the high temperature properties of dry-mix concrete blocks," *Constr. Build. Mater.*, vol. 209, pp. 522-531, Jun. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.131>
- [48] T. -C. Ling, C. -S. Poon, and H. -W. Wong, "Management and recycling of waste glass in concrete products: Current situations in Hong Kong," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 70, pp. 25-31, Jan. 2013. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.10.006>

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no existe ningún conflicto de intereses económicos, profesionales o personales que puedan influir de forma inapropiada en los resultados obtenidos en este artículo.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA

William Gustavo Valencia-Saavedra: conceptualización, supervisión, diseño de la investigación, redacción y revisión final del manuscrito.

Carolina Gómez-Rojas y Ana Revelo: desarrollo de la investigación.

Ruby Mejía de Gutiérrez: conceptualización, diseño de la investigación, supervisión, redacción y revisión final del manuscrito.