

IDEA



Construcción y Madera

Volumen 6 - Año: 2024 - ISSN: 2590-4612



Centro de Tecnologías para
la Construcción y la Madera

SENNOVA
Sistema de Investigación,
Desarrollo Tecnológico e Innovación



**CTCM
SENNOVA**

Diseño de mezclas y elaboración de prototipos de bloques, adoquines de concreto con la utilización de materiales de residuos de construcción y demolición (RCD)

Duber Mauricio Flórez Correa¹, Maryorie Córdoba Ramírez², Jhon Darwyn Jiménez Ramírez³, Sandra Milena Velásquez Restrepo⁴.
¹dcorreaf@sena.edu.co, ²mcordobar@sena.edu.co, ³jdjimenezr@sena.edu.co, ⁴smvelasquez@sena.edu.co (Autor de correspondencia).
Centro para el Desarrollo del Hábitat y la Construcción, SENA, Medellín, Colombia.

- Design of mixes and development of prototypes of concrete blocks and pavers using construction and demolition waste (CDW) materials
- Desenho de misturas e desenvolvimento de protótipos de blocos e pavers de concreto com a utilização de materiais de resíduos de construção e demolição (RCD)

Artículo de investigación



Fuente: propia.

Abstract

La aceleración del crecimiento poblacional y la expansión urbana han intensificado el consumo de recursos naturales y la generación de residuos de construcción y demolición (RCD), planteando desafíos ambientales significativos. Este estudio evalúa la viabilidad técnica y ambiental del uso de RCD en la fabricación de materiales de construcción sostenible, alineándose con los principios de la economía circular y la normativa colombiana vigente. A las mezclas estudiadas se les incorporaron residuos de concreto, cerámica, vidrio molido y carbón inactivo provenientes de actividades constructivas y otros sectores productivos. La metodología experimental incluyó la recolección, clasificación, trituración y determinación de propiedades de los materiales, seguidas por la formulación de diez mezclas que contenían diferentes proporciones de RCD y otros ingredientes relevantes empleados regularmente en el sector de la construcción. Los especímenes cilíndricos elaborados fueron sometidos a ensayos de resistencia a la compresión. Los resultados indicaron que las formulaciones cumplen con los estándares para aplicaciones estructurales y no estructurales de acuerdo con normas ampliamente aceptadas, permitiendo la fabricación de bloques, adoquines y concretos que incluso alcanzaron resistencia a la compresión de hasta 21 MPa. Se realizó un análisis de impacto ambiental empleando un software comercial de evaluación de ciclo de vida del producto, encontrando que los bloques elaborados con materiales reciclados disminuyen la huella ambiental en comparación con materiales vírgenes industrializados, pero en el caso de los adoquines la huella ambiental de los materiales reciclados es mayor, un aspecto que debe ser considerado cuando se desarrollan iniciativas con materiales reciclados. Además de reducir la acumulación de residuos en vertederos, esta propuesta fomenta la sostenibilidad mediante la reutilización de materiales y la disminución de la extracción de recursos vírgenes. Este enfoque no solo responde a la normativa colombiana, sino que también promueve un modelo de desarrollo sostenible en el sector construcción, ofreciendo soluciones innovadoras para los desafíos ambientales y sociales asociados con el crecimiento urbano y la generación de RCD.

Palabras clave: Adoquines, bloques de concreto, economía circular, Residuos de construcción y demolición (RCD), sostenibilidad.

Abstract

The acceleration of population growth and urban expansion has intensified the consumption of natural resources and the generation of construction and demolition waste (CDW), posing significant environmental challenges. This study evaluates the technical and environmental feasibility of using CDW in the production of sustainable construction materials, aligning with circular economy principles and the current Colombian regulations. The studied mixtures were incorporated with concrete, ceramic, crushed glass, and inactive carbon residues derived from construction activities and other productive sectors. The experimental methodology included the collection, classification, crushing, and characterization of the materials, followed by the formulation of ten mixtures containing varying proportions of CDW and other commonly used construction materials. Cylindrical specimens were subjected to compressive strength tests. Results demonstrated that the formulations meet standards for structural and non-structural applications based on generally accepted regulations, enabling the production of blocks, pavers, and concrete with compressive strengths up to 21 MPa. An environmental impact analysis was conducted using commercial life cycle assessment software, revealing that blocks made with recycled materials reduce the environmental footprint compared to industrially processed virgin materials. However, for pavers, the environmental footprint of recycled materials was higher which is an issue to be considered in recycled material initiatives. Besides reducing landfill waste accumulation, this proposal fosters sustainability by reusing materials and minimizing virgin resource extraction. This approach not only complies with Colombian regulations but also supports a sustainable development model in the construction sector, providing innovative solutions to the environmental and social challenges associated with urban growth and CDW generation.

Keywords: Circular economy, concrete blocks, Construction and Demolition Waste (CDW), pavers, sustainability.

Resumo

A aceleração do crescimento populacional e a expansão urbana intensificaram o consumo de recursos naturais e a geração de resíduos de construção e demolição (RCD),

apresentando desafios ambientais significativos. Este estudo avalia a viabilidade técnica e ambiental do uso de RCD na fabricação de materiais de construção sustentáveis, alinhando-se aos princípios da economia circular e às regulamentações colombianas vigentes. As misturas estudadas incorporaram resíduos de concreto, cerâmica, vidro moído e carvão inativo provenientes de atividades construtivas e outros setores produtivos. A metodologia experimental incluiu a coleta, classificação, trituração e determinação das propriedades dos materiais, seguidas pela formulação de dez misturas contendo diferentes proporções de RCD e outros ingredientes relevantes regularmente utilizados no setor da construção. Os corpos de prova cilíndricos elaborados foram submetidos a ensaios de resistência à compressão. Os resultados demonstraram que as formulações atendem aos padrões para aplicações estruturais e não estruturais, de acordo com normas amplamente aceitas, permitindo a fabricação de blocos, pavimentos e concretos que alcançaram resistência à compressão de até 21 MPa. Foi realizado um análise de impacto ambiental utilizando um software comercial de avaliação do ciclo de vida do produto, revelando que os blocos fabricados com materiais reciclados reduzem a pegada ambiental em comparação com materiais virgens industrializados. No entanto, no caso dos pavimentos, a pegada ambiental dos materiais reciclados é maior, um aspecto que deve ser considerado no desenvolvimento de iniciativas com materiais reciclados. Além de reduzir o acúmulo de resíduos em aterros, esta proposta promove a sustentabilidade por meio da reutilização de materiais e da redução da extração de recursos virgens. Essa abordagem não apenas atende às regulamentações colombianas, mas também apoia um modelo de desenvolvimento sustentável no setor da construção, oferecendo soluções inovadoras para os desafios ambientais e sociais associados ao crescimento urbano e à geração de RCD.

Palavras-chave: Blocos de concreto, economia circular, pavers, Resíduos de Construção e Demolição (RCD), sustentabilidade.

Introducción

El acelerado crecimiento poblacional y la expansión urbana han impulsado una demanda significativa de infraestructura, intensificando la explotación de recursos naturales y agravando los problemas ambientales a nivel global (Mahpour, 2018). Aunque advertencias previas señalaron la finitud de los materiales empleados en la industria de la construcción, la extracción intensiva y no sostenible de recursos no renovables persiste como una práctica dominante. Paralelamente, la generación de residuos de construcción y demolición (RCD), sumado a su manejo inadecuado y la escasa implementación de estrategias integrales de gestión, se ha convertido en un desafío ambiental significativo (Al-Raqeb et al., 2023). Ante esta problemática, el sector construcción enfrenta el imperativo de reducir su impacto mediante la adopción de soluciones innovadoras que promuevan la sostenibilidad (Alhawati et al., 2022).

Entre estas soluciones, el aprovechamiento de RCD para la fabricación de materiales sostenibles como bloques, adoquines y geopolímeros representa una alternativa viable. Esta práctica no solo contribuye a una gestión eficiente de los desechos, sino que también impulsa la transición hacia una economía circular (Davidovits, 2020; Singh & Middendorf, 2020). Sin embargo, en la actualidad, gran parte de los RCD son desechados en vertederos o abandonados, generando impactos ambientales negativos y desperdiciando recursos con alto potencial de reutilización en aplicaciones constructivas (Papamichael et al., 2023).

El caso colombiano es particularmente crítico. El rápido crecimiento urbano ha intensificado las actividades de construcción y demolición, aumentando significativamente la generación de RCD (Sánchez Pacheco, 2020). Esto subraya la necesidad de implementar enfoques sostenibles para su gestión (ICONTEC Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, 2020a). Ejemplos locales, como la iniciativa de la empresa INDURAL, que utiliza RCD y materiales provenientes de excavaciones para fabricar elementos de concreto, ilustran la viabilidad de prácticas que reducen la dependencia de recursos naturales y contribuyen a la disminución de emisiones de gases de efecto invernadero (Iyiola et al., 2023).

Entre los materiales reciclados, el vidrio molido destaca por su viabilidad en la producción de geopolímeros, reconocidos por su alta resistencia a la compresión y durabilidad (Starczyk-Kořbyk & Maćek, 2023). Los geopolímeros, elaborados mediante la activación alcalina de precursores ricos en sílice y alúmina, constituyen una alternativa sostenible al cemento Portland, contribuyendo significativamente a la reducción de emisiones de CO₂ (Mendes et al., 2021). De manera similar, el reciclaje de concreto y cerámica ha demostrado ser una estrategia efectiva para la fabricación de materiales de construcción sostenibles, como bloques y adoquines, que promueven la sostenibilidad y reducen el impacto ambiental (Iyola et al., 2023).

Aunque el marco normativo colombiano, como la Resolución 0472 de 2017, fomenta la gestión integral de los RCD y su aprovechamiento, desafíos técnicos como la variabilidad en su composición química y la necesidad de métodos eficaces de pretratamiento limitan su adopción generalizada (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de la República de Colombia, 2017). En este contexto, esta investigación busca cerrar brechas tecnológicas evaluando la viabilidad técnica y ambiental del uso de RCD en la fabricación de bloques y adoquines de concreto.

Metodología

En el presente estudio se empleó una metodología experimental diseñada para evaluar la viabilidad técnica y ambiental del uso de residuos de construcción y demolición (RCD) en la fabricación de bloques y adoquines de concreto. Este enfoque permitió replicar los procesos implementados y garantizar la validación técnica de los resultados mediante una estructuración de actividades orientadas al logro de los objetivos planteados. Estas actividades abarcaron desde la recolección y caracterización de materiales hasta la fabricación y evaluación de prototipos, siguiendo principios de investigación aplicada respaldados por un estudio previo reportado sobre la reutilización de residuos en la construcción (Sánchez Pacheco, 2020).

La primera etapa consistió en la recolección y clasificación de los RCD provenientes de diversas fuentes. Los residuos de concreto y cerámicos fueron

obtenidos del Centro para el Desarrollo del Hábitat y la Construcción (CDHC) del SENA Regional Antioquia, como subproductos de demoliciones y prácticas constructivas realizadas en el marco de los programas de formación que se imparten en la entidad. El vidrio molido fue suministrado por la empresa Ecocircular, mientras que el carbón inactivo, proveniente de procesos de tratamiento de aguas residuales, fue aportado por la Planta de Tratamiento Aguas Claras que opera Empresas Públicas de Medellín. Estos materiales fueron clasificados en cuatro categorías principales: cerámicos, concreto, vidrio y carbón inactivo.

Cada material fue sometido a conminución utilizando una trituradora mecánica, con el propósito de reducir los tamaños de las partículas a dimensiones adecuadas para ser usados en mezclas de concreto. Posteriormente, los materiales triturados fueron tamizados con tamices número 4 y $\frac{3}{4}$ para separar las fracciones finas y gruesas, asegurando una granulometría uniforme para las mezclas experimentales. Los residuos tamizados fueron almacenados en un espacio bajo techo y seco, con cada lote debidamente etiquetado para evitar contaminaciones cruzadas y garantizar su trazabilidad durante el proceso de investigación siguiendo las recomendaciones de la norma NTC 4026:1997, que es la vigente actualmente (ICONTEC Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, 1997).

A los residuos de vidrio triturados y a los agregados finos se les determinó la granulometría empleando el método de separación mediante tamices bajo norma NTC 77:2028 (ICONTEC Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, 2018). En el caso de los RCD cerámicos y de concreto, así como a los agregados gruesos convencionales, se les determinaron parámetros como la densidad relativa seca al horno, la densidad relativa saturada superficialmente seca, la densidad relativa aparente y la absorción de humedad. En el caso de los agregados gruesos se les determinaron las propiedades conforme a la norma NTC 176:2019 (ICONTEC Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, 2019), mientras que el análisis de los agregados finos se realizó siguiendo la norma NTC 237:2020 (ICONTEC Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, 2020b). Estos ensayos se

realizaron en Laboratorio de Ensayos de Agregados, Concretos y Cementos – LEACCEM del Centro para el Desarrollo del Hábitat y la Construcción del SENA Regional Antioquia. Estas pruebas se orientaron a garantizar que los materiales reciclados cumplieran con los requisitos técnicos necesarios para su incorporación en las mezclas experimentales.

Luego se formularon las mezclas a ser estudiadas, variando el contenido de RCD y residuos posconsumo, empleando también cemento Portland de uso general, triturado y arena de concreto. El diseño de las mezclas se elaboró considerando tanto las propiedades mecánicas requeridas como los estándares establecidos en la norma NTC 550, que regula la preparación y curado de especímenes de concreto en el sitio de trabajo (ICONTEC Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, 2020c). En la Tabla 1 se presentan las diez formulaciones elaboradas, resaltando que durante la preparación de las mezclas y los cilindros se evaluó la manejabilidad, fraguado y colocación, de tal manera que en algunas formulaciones fue necesario repetir el mezclado hasta

obtener las condiciones idóneas necesarias para moldear los cilindros de compresión.

Las mezclas fueron preparadas en condiciones controladas, moldeando especímenes cilíndricos que fueron curados durante 7 días y posteriormente sometidos a ensayos de resistencia a la compresión. Estas pruebas fueron realizadas en el laboratorio LEACCEM del Centro para el Desarrollo del Hábitat y la Construcción del SENA Regional Antioquia.

Luego de comparar los resultados obtenidos, se identificó la mezcla más idónea para la fabricación de bloques y adoquines, fabricando prototipos de estos elementos constructivos utilizando moldes acordes a cada geometría y siguiendo procedimientos estandarizados. Los prototipos se fabricaron usando una máquina Graco Ram hidráulica de accionamiento manual. Los prototipos fueron sometidos a pruebas de resistencia mecánica y durabilidad, lo que permitió evaluar su desempeño bajo condiciones similares a las aplicaciones reales en campo siguiendo lo estipulado en un estudio reciente reportado en la literatura (Flórez Gelves, 2023).

Tabla 1.
Formulaciones estudiadas en este trabajo.

Componente empleado	Identificación de la mezcla									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Relación agua/cemento	0.66	0.60	0.70	0.65	0.59	0.47	0.67	0.47	0.47	0.7
Cemento (%)	23.0	23.0	23.0	20.6	20.6	20.6	22.9	28.0	23.3	33.2
Arena convencional (%)	25.3	25.3	25.3	17.5	17.5	17.5	15.5	24.1	20.1	20.9
Arena de RCD (%)	17.0	17.0	17.0	26.2	26.2	26.2	30.8	47.9	-	-
Agregado grueso convencional ¾ (%)	19.1	19.1	19.1	16.1	16.1	16.1	30.8	-	-	-
Grava de RCD cerámicos (%)	15.6	15.6	15.6	19.6	19.6	19.6	-	-	42.2	-
Vidrio triturado (%)	-	-	-	-	-	-	-	-	14.4	-
Grava en carbón inactivo (%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	45.8

Fuente: elaboración propia.

Los resultados obtenidos fueron analizados en comparación con las normativas NTC 4026 (ICONTEC Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, 1997), NTC 4076 (ICONTEC Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, 2017) y NTC 3829 (ICONTEC Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, 2022), que establecen los requisitos para bloques de concreto estructurales y no estructurales, así como para adoquines de tránsito peatonal y vehicular liviano.

Se llevó a cabo una evaluación del impacto ambiental, el ciclo de vida y la huella de carbono en la gestión de residuos de construcción y demolición (RCD) utilizando el software openLCA. Esta herramienta fue seleccionada por su capacidad para realizar análisis detallados del ciclo de vida (LCA) y cálculos precisos de huella de carbono, garantizando que las prácticas implementadas contribuyan al enfoque de sostenibilidad de procesos y productos, como se ha reportado para bloques y elementos de construcción similares a los estudiados en este trabajo (Edun & Hachem-Vermette, 2022). Esta parte del estudio se centró en evaluar la huella ambiental asociada al desarrollo de prototipos de bloque y de adoquín, empleando la base de datos ecoinvent elcd_3_2_greendelta_v2_17, elegida por su amplia cobertura, calidad de datos y alineación con normativas europeas. Asimismo, se incorporó el método de impacto OpenLCA LCIA method pack 1.5.7, destacado por su flexibilidad, su cobertura integral de categorías de impacto, su compatibilidad con OpenLCA y su adaptabilidad a diversas aplicaciones.

El proceso de modelado en openLCA implicó la creación de diferentes elementos fundamentales para estructurar el análisis. En primer lugar, se definió una categoría de producto, la cual clasifica y organiza el producto en un sector específico, asegurando su correcta integración en la base de datos. Posteriormente, se estableció el proceso del producto, que permite modelar las etapas y actividades asociadas al ciclo de vida de este. Además, se definieron los flujos hacia el proceso, representando los materiales, energías y emisiones involucrados en cada etapa del ciclo de vida. Finalmente, se integraron estos componentes en el sistema del producto, una entidad comprensiva que sintetiza todos los procesos y flujos, proporcionando una visión global de los impactos

ambientales asociados al ciclo de vida del producto, como ha sido reportado en estudios orientados a elementos de construcción tanto estructurales como no estructurales (Huang et al., 2024).

El sistema del producto constituye el eje central del análisis, ya que agrupa y conecta todos los procesos y flujos, permitiendo una evaluación exhaustiva de los impactos ambientales asociados al ciclo de vida del producto. Esta integración garantiza que el análisis refleje con precisión las interacciones complejas y los efectos acumulativos en todas las etapas del ciclo de vida, proporcionando así una base sólida para la toma de decisiones orientadas a la sostenibilidad.

Resultados y discusión

1. Evaluación de agregados y RCD empleados en las mezclas

En la Figura 1 se puede observar la apariencia de los RCD triturados y los agregados que se emplearon en la obtención de las mezclas estudiadas. Se puede constatar que los RCD se procesaron empleando métodos accesibles para todo tipo de empresas del sector construcción, sin que se requieran equipos o métodos altamente tecnificados, lo cual constituye una ventaja para que aumente el uso de RCD en el sector construcción.

Figura 1.

Apariencia de los RCD triturados y los agregados que se emplearon para la obtención de las mezclas.



Fuente: elaboración propia.

En la Tabla 2 se presentan las propiedades medidas para los residuos de baldosa triturados, el agregado grueso convencional y los agregados finos de RCD.

Tabla 2.
Propiedades de los agregados gruesos obtenidos de residuos de baldosas.

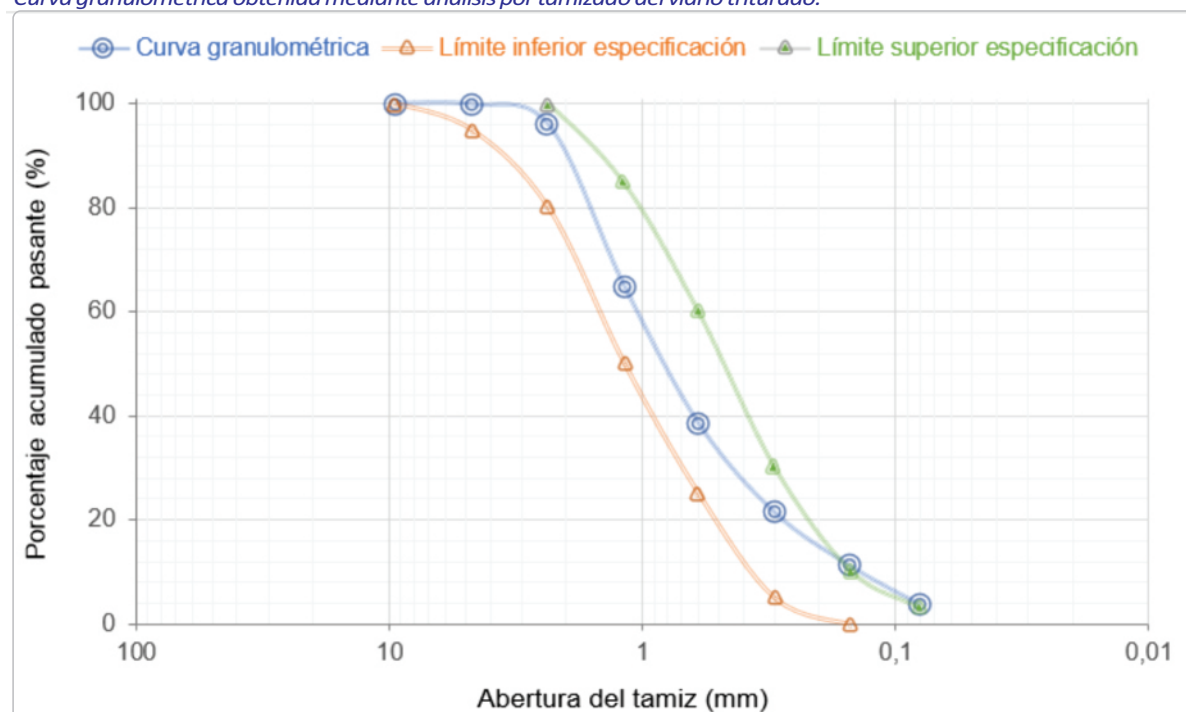
Propiedad	Residuos de baldosas	Agregado grueso convencional	Arena de RCD
Densidad relativa (Gravedad específica) seca al horno	2.13	2.67	3.95
Densidad relativa (Gravedad específica) saturada superficialmente seca	2.30	2.74	4.04
Densidad relativa aparente (Gravedad específica)	2.56	2.87	4.34
Absorción de humedad (%)	7.7	2.6	2.3

Fuente: elaboración propia.

Los resultados evidencian que los residuos de baldosas presentan menor densidad relativa y mayor absorción de humedad en comparación con los agregados convencionales y la arena de RCD, sugiriendo una mayor porosidad de los residuos de baldosas, lo que puede afectar la relación agua-cemento, trabajabilidad y resistencia mecánica del concreto. No obstante, esta alta absorción podría favorecer la interacción con la pasta cementante en

condiciones de saturación. La arena de RCD, con alta densidad relativa y baja absorción, presenta propiedades más similares a los materiales convencionales, lo que permite complementar las mezclas. Estas consideraciones deben tomarse en cuenta de manera coherente con los resultados obtenidos en las demás etapas del estudio, con el fin de identificar si son viables para ser implementadas en construcciones de mediana o gran escala.

Figura 1.
Curva granulométrica obtenida mediante análisis por tamizado del vidrio triturado.



Fuente: elaboración propia.

En la Figura 1 se presentan los resultados obtenidos del análisis por tamizado del vidrio triturado empleado para la elaboración de las mezclas, encontrando que tiene un módulo de finura de 2.68.

En la Figura 2 se presentan los resultados obtenidos del análisis por tamizado de los agregados finos empleados para la elaboración de las mezclas, encontrando que tiene un módulo de finura de 3.26. Las diferencias identificadas

en la granulometría influyen en la trabajabilidad y demanda de agua de las mezclas que contienen este tipo de ingredientes. Los agregados finos reducen la segregación y controlan la relación agua-cemento, mientras que el vidrio triturado mejora la cohesión y el llenado de vacíos. Su integración permite un balance granulométrico que optimiza las propiedades mecánicas y de durabilidad de los prototipos, factores que pueden favorecer la viabilidad del uso de este tipo de materiales en las mezclas.

Figura 2.

Curva granulométrica obtenida mediante análisis por tamizado de los agregados finos.

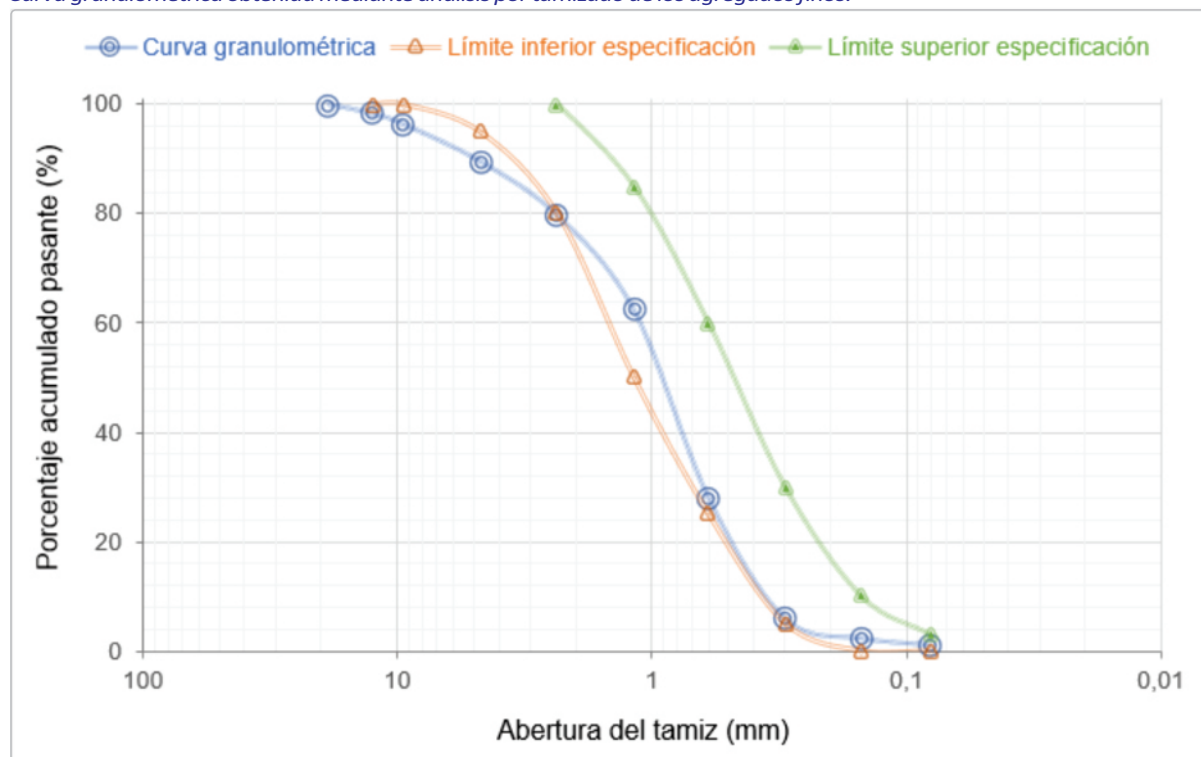
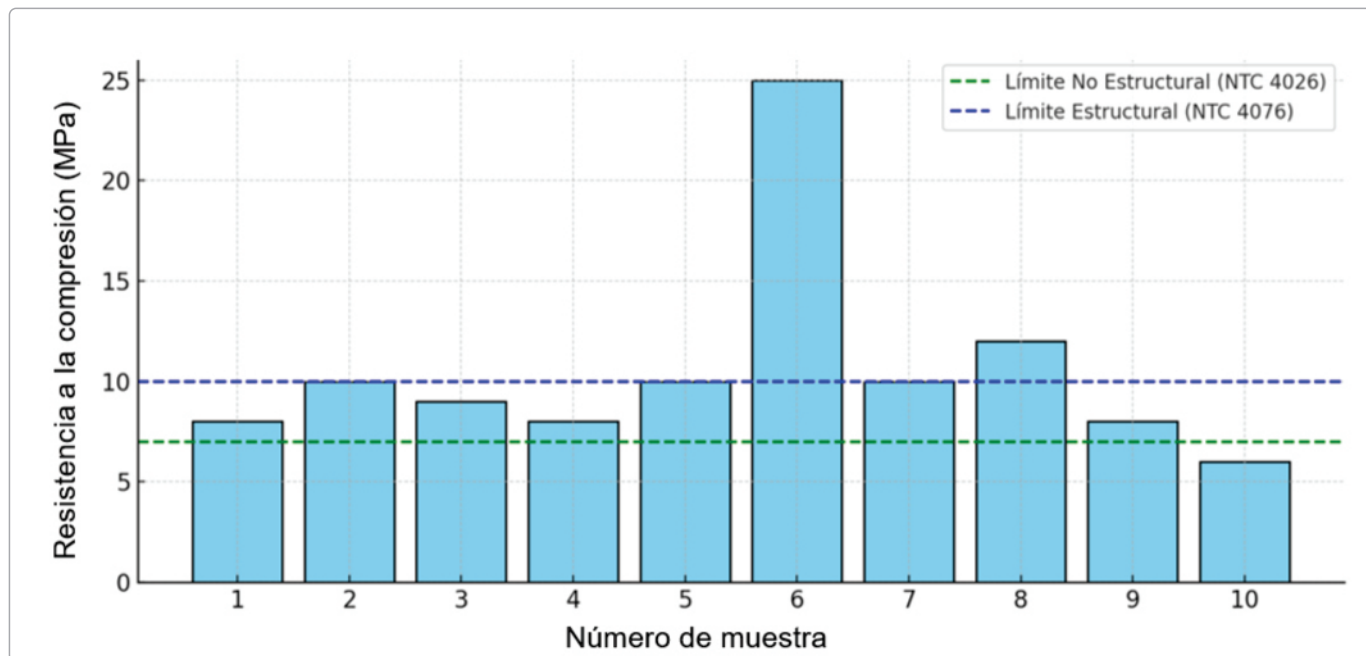


Figura 3.

Resistencia a la compresión luego de 7 de días de fraguado de cilindros fabricados con las mezclas estudiadas.



Fuente: elaboración propia.

Por otro lado, las mezclas que incorporan grava de RCD cerámicos, es decir las mezclas 9 y 10, presentan un desempeño mecánico variable. La mezcla 9, con 42.2% de grava de RCD cerámicos y 14.4% de vidrio triturado, alcanza un desempeño adecuado para aplicaciones no estructurales, mientras que la mezcla 10, con un 45.8% de grava en carbón inactivo, muestra una reducción significativa en la resistencia, lo que podría estar relacionado con la alta relación agua/cemento (0.70) y las características intrínsecas de la grava en carbón, como su posible fragilidad o capacidad de absorción.

Las mezclas 1 a 6, que contienen proporciones más altas de agregados convencionales, exhiben resistencias más consistentes, siendo las mezclas 5 y 6 las más prometedoras para aplicaciones estructurales debido a su bajo contenido de agua (relación agua/cemento de 0.47) y el uso equilibrado de arena de RCD y agregados convencionales. Estas mezclas, especialmente la 6 que presenta la mayor resistencia a la compresión entre todas las combinaciones estudiadas, superan notoriamente el límite establecido por la NTC 4076, destacándose como opciones viables para elementos estructurales en concreto.

La arena de RCD mejora la cohesión y el llenado de vacíos, mientras que la grava de RCD cerámicos aporta rigidez

estructural, aunque debe controlarse su proporción para evitar una disminución de las resistencias mecánicas. El vidrio triturado que se usó en la mezcla 9, contribuye a la matriz cementante al actuar como un material de relleno fino, aunque su influencia parece depender de la adecuada dosificación y su interacción con otros componentes.

Como tendencia general, se observa que las mezclas que incorporan materiales reciclados como arena de RCD y grava de RCD cerámicos muestran un desempeño adecuado para aplicaciones no estructurales y, en algunos casos, estructurales, siempre que se optimicen las proporciones y relaciones agua/cemento. Estas observaciones destacan la viabilidad técnica y ambiental del uso de materiales reciclados en la elaboración de bloques y adoquines, alineándose con los principios de sostenibilidad y economía circular en la construcción.

Al igual que con los materiales convencionales, las mezclas con residuos requieren que tanto el curado como la selección adecuada de los materiales sean considerados factores críticos en la obtención de mezclas viables y consistentes. El desempeño limitado de estas muestras subraya la necesidad de implementar controles más rigurosos en los procesos de fabricación y monitoreo de las propiedades de los materiales empleados.

3. Elaboración y evaluación de prototipos

La formulación de la muestra 6 se utilizó para la fabricación de adoquines de concreto, debido a su desempeño destacado en la incorporación de materiales reciclados de construcción y demolición (RCD) y a su cumplimiento con los requisitos de la norma NTC 3829 (ICONTEC Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, 2022), que establece los estándares para adoquines de concreto de uso peatonal. Esta formulación no solo demostró su idoneidad técnica, sino que también representó una alternativa sostenible al reducir la dependencia de materiales vírgenes. Para garantizar la calidad de los prototipos, se siguieron estrictamente los procedimientos de dosificación y moldeo recomendados.

El adoquín prototipo elaborado con la formulación de la muestra 6 presenta dimensiones de 12.5 cm de ancho, 12.5 cm de alto y 3.5 cm de espesor, con un peso total de 1.092 kg. Estas características lo hacen apto para aplicaciones peatonales, destacándose por su resistencia mecánica y durabilidad, elementos clave para este tipo de estructuras.

En paralelo, se realizaron los primeros prototipos de bloques de concreto utilizando como referencia la muestra 9, que integró vidrio molido reciclado de posconsumo en su diseño de mezcla. Este enfoque buscó evaluar la viabilidad técnica del vidrio como sustituto parcial del agregado fino, con miras a desarrollar bloques de concreto sostenibles y de alto rendimiento. Las dimensiones de estos bloques fueron de 9.5 cm de alto, 14.7 cm de ancho y 30 cm de profundidad, con un peso total de 8.86 kg.

Adicionalmente, se elaboraron prototipos de bloques de concreto basados en la muestra 8, la cual contiene RCD de concretos y cerámicos. Esta formulación también fue evaluada por su viabilidad técnica para la producción de bloques de concreto, destacándose por su capacidad para aprovechar materiales reciclados sin comprometer las propiedades mecánicas del producto final. En la Figura 4 se presentan imágenes que ilustran procesos efectuados con los prototipos.

Figura 4.

Imágenes ilustrativas de procesos de pesaje y realización de ensayos de compresión efectuados al prototipo.



Fuente: elaboración propia.

La resistencia a la compresión de los prototipos cumplió con lo estipulado según el diseño de mezcla planteado en la fase previa, alcanzando resistencias acordes a las obtenidas en las mezclas usadas para moldear los cilindros.

4. Análisis de sostenibilidad

Para este análisis se consideró que los bloques se fabricaban con cemento proveniente de una planta ubicada

a 158 km y arena extraída en una cantera localizada a 13 km del sitio de elaboración, mientras que los demás ingredientes estaban disponibles en el sitio donde se disponían y trituraban los residuos de construcción y demolición. En la Tabla 3 se presenta la información considerada para el análisis de sostenibilidad de la fabricación de los bloques, en lo que respecta a los equipos usados.

Tabla 3.
Variables consideradas para estimar la huella ambiental asociada al uso de equipos para la elaboración del bloque y del adoquín.

Equipo	Potencia (Kw)	Bloque		Adoquín	
		Tiempo de elaboración requerido	Consumo (Kwh)	Tiempo de elaboración requerido	Consumo (Kwh)
Báscula	0.006	0.133	0.80	0.100	0.001
Trituradora	4.18	0.033	0.14	0.033	0.14
Compactadora	4.18	0.083	0.35	-	-

Fuente: elaboración propia.

Para el análisis se consideró la fabricación de bloques de 8.86 kg. La evaluación usando el método CML del software openLCA para estimar el impacto del ciclo de vida (LCIA) del bloque, encontró una emisión de 0.94 kg de CO₂ por cada kilogramo de cemento Portland empleado, en términos de su potencial de calentamiento global (GWP) durante un período de 100 años. Es un factor determinante dado que este cemento es uno de los materiales más críticos en términos de emisiones de gases de efecto invernadero, debido al proceso de calcinación del Clinker (Huang et al., 2024). Este impacto, sumado a las emisiones asociadas a los materiales empleados en la fabricación del bloque, 0.071 kg de CO₂ emitidos por concepto de transporte de los materiales en las distancias consideradas, y a 0.00338 kg de CO₂ equivalente por la cantidad de agua que se requiere para elaborar el bloque, dan como resultado que las emisiones generadas por el proceso de elaboración del bloque en un horizonte temporal de 100 años contribuyen al calentamiento global de manera equivalente a 4.53 kg de CO₂, valor que ya tiene en cuenta el impacto de los gases de efecto invernadero como el dióxido de carbono (CO₂) y el metano (CH₄).

Al comparar en el software el impacto de la fabricación del bloque con residuos, se obtiene un resultado de 4.54 kg de CO₂ emitidos durante su ciclo de vida, es decir, considerando desde la producción hasta el final de su vida

útil, incluyendo flujos de materiales y transporte, proyectados en el transcurso de 100 años. En el caso de la fabricación del bloque empleando materiales tradicionales, se generan 8.59 kg de CO₂ en el mismo tiempo, como consecuencia del uso de materiales industrializados que tienen una mayor huella de carbono.

Para la fabricación de los adoquines de 1.1 kg, se encontró que la elaboración con materiales reciclados genera emisiones de 1.21 de CO₂ equivalente, mientras que el uso de materiales tradicionales implica emisiones de 0.70 kg de CO₂ equivalente, lo cual se debe al rol del cemento en la mezcla, ya que como se ha mencionado es uno de los principales contribuyentes al cambio climático. El otro factor incidente se asocia al consumo de energía de los equipos necesarios para triturar los residuos, que en el caso del adoquín tienen una mayor incidencia que en la fabricación de los bloques. Sin embargo, pueden optimizarse las formulaciones para disminuir el contenido de cemento Portland y aumentar la proporción de residuos de construcción y demolición de menor consumo intensivo de energía durante su fabricación.

Conclusiones

La investigación desarrollada permitió evaluar diversas formulaciones de mezcla de concreto enfocadas en la sostenibilidad y el aprovechamiento de materiales de

construcción reciclados, logrando importantes hallazgos en términos de resistencia, manejabilidad y aplicaciones potenciales. Las conclusiones obtenidas ofrecen un marco para la implementación de prácticas innovadoras y sostenibles en el sector de la construcción, pues si bien se realizó un diseño experimental exploratorio es de resaltar que permitió comparar el efecto de la relación agua/cemento y del contenido de agregados gruesos convencionales, agregados finos y gruesos provenientes de residuos de construcción y demolición (RCD) de concreto y cerámicos, y de cemento.

Algunas de las mezclas propuestas en este trabajo alcanzaron resistencias superiores a 10 MPa a los 7 días de curado con relaciones agua/cemento bajas. Se identificó que un menor contenido de agua mejora significativamente la resistencia del concreto, aunque disminuye su manejabilidad, resultando en un asentamiento casi nulo en los cilindros. Por otro lado, mezclas con relaciones agua/cemento más altas mostraron mayor fluidez y facilidad de colocación, pero con resistencias inferiores.

La formulación que contenía vidrio molido reciclado como reemplazo parcial del agregado fino mostró resultados prometedores para la fabricación de bloques estructurales. Con un 17% de cemento en la mezcla, esta formulación alcanzó una resistencia a la compresión prometedora para aplicaciones estructurales, pero exige un control estricto del curado para garantizar consistencia en los resultados.

El diseño de mezcla que reemplazó al 100% los agregados convencionales con RCD cerámicos y un 22% de cemento sobre la masa total presentó un rendimiento sobresaliente, logrando una resistencia de 24 MPa, adecuada para aplicaciones estructurales específicas, como adoquines y mobiliario urbano. Sin embargo, la NTC 174, que regula el uso de RCD, señala que aún no se dispone de evidencia suficiente sobre su comportamiento a largo plazo, limitando su uso en elementos críticos como vigas o columnas.

En cuanto a mezclas con materiales no convencionales, el uso de carbón inactivo granulado no fue viable debido a problemas de aglutinación y manejabilidad. Este material mostró una pobre adhesión y una resistencia deficiente, alcanzando apenas 3 MPa, lo que lo descarta para aplicaciones estructurales y no estructurales. Por el contrario, el carbón inactivo molido podría representar una alternativa a explorar, dada su mayor capacidad de integración en mezclas.

El análisis de los prototipos elaborados a partir de estas formulaciones reveló aspectos importantes para la optimización de los diseños. Por ejemplo, los adoquines fabricados con RCD cerámicos conservaron su forma y dimensiones tras el desencofrado, mostrando su viabilidad técnica. Por otro lado, los bloques de concreto que utilizaron RCD cerámicos de tamaño $\frac{3}{4}$ " presentaron acabados deficientes en su estética. Al ajustar la granulometría a un agregado cerámico #4, los resultados en términos de acabado y especificaciones estéticas mejoraron notablemente.

Desde una perspectiva sostenible, las mezclas desarrolladas lograron incorporar entre un 38% y 42% de RCD, lo que representa un importante porcentaje de reutilización de residuos en la industria de la construcción. Estos hallazgos reafirman el potencial de los materiales reciclados para reducir el impacto ambiental, optimizando la gestión de desechos y minimizando la dependencia de recursos vírgenes.

El análisis del impacto ambiental reveló que la fabricación de bloques con RCD reduce significativamente las emisiones de CO₂ por ciclo de vida en comparación con bloques tradicionales. Aunque los adoquines fabricados con materiales reciclados generan mayor cantidad de CO₂ equivalente, este comportamiento se debe al contenido de cemento y al consumo energético en la trituración de los residuos, la cual juega un rol de mayor efecto en el caso de los adoquines que en los bloques. Los resultados indican que optimizar las formulaciones disminuyendo cemento y aumentando RCD puede mejorar la sostenibilidad ambiental, pero la evaluación integral debe considerar tanto el uso de materiales reciclados como la estimación cuantitativa del impacto ambiental, para tomar decisiones con criterios debidamente sustentados.

Se recomienda establecer colaboraciones con empresas que trabajan con RCD, para escalar estas formulaciones y evaluar su viabilidad financiera y competitividad en el mercado actual. Además, se sugiere profundizar en investigaciones futuras que analicen el desempeño a largo plazo de estos materiales, particularmente en condiciones reales de uso, así como su impacto económico y ambiental en proyectos de construcción a gran escala. Estas acciones permitirán consolidar las bases para una construcción más sostenible y responsable.

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento a la estrategia SENNOVA del Servicio Nacional de Aprendizaje SENA por la financiación de la investigación que dio origen a este estudio, y al Centro para el Desarrollo del Hábitat y la Construcción del SENA Regional Antioquia por el apoyo y la disposición para la realización de actividades metodológicas claves para este trabajo.

Contribución de autoría

Duber Mauricio Flórez Corre (ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-9331-1794>): metodología, logística, investigación, análisis de datos, borrador original.

Maryorie Córdoba Ramírez (ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-9415-8065>): metodología y análisis para estimar el impacto del ciclo de vida (LCIA)

Jhon Darwyn Jiménez Ramírez (ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3844-6553>): conceptualización, logística, investigación, análisis de datos.

Sandra Milena Velásquez Restrepo (ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6697-2801>): escritura, revisión, elaboración de conclusiones y edición.

Referencias

- Alhawati, M., Ashour, A., Yildirim, G., Aldemir, A., & Sahmaran, M. (2022). Properties of geopolymers sourced from construction and demolition waste: A review. *Journal of Building Engineering*, 50, 104104. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104104>
- Al-Raqeb, H., Ghaffar, S. H., Al-Kheetan, M. J., & Chougan, M. (2023). Understanding the challenges of construction demolition waste management towards circular construction: Kuwait Stakeholder's perspective. *Cleaner Waste Systems*, 4, 100075. <https://doi.org/10.1016/j.clwas.2023.100075>
- Davidovits, J. (2020). *Geopolymer: Chemistry & applications* (5th ed). Institut Géopolymère.
- Edun, A., & Hachem-Vermette, C. (2022). Post-consumer waste recycling for high performance building envelopes in cold climates: Assessing energy and environmental impacts. *Journal of Cleaner Production*, 372, 133686. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133686>
- Flórez Gelves, A. (2023). Guía metodológica para la correcta implementación del pulimento de especímenes cilíndricos de concreto como método de refrentado no adherido [Tesis de Maestría en Construcción, Universidad Nacional de Colombia]. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/84538>
- Huang, B., Ge, Y., Wang, X., Wang, Y., Wang, J., Song, C., Zhu, J., Amaechi, C. V., & Sun, J. (2024). Recycled ceramic brick powder utilization in fiber reinforced 3D printing concrete: An eco-friendly substitute to conventional fine aggregates. *Journal of Building Engineering*, 98, 111441. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.111441>
- ICONTEC Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (1997). NTC 4026:1997 Ingeniería civil y arquitectura. Unidades (bloques y ladrillos) de concreto, para mampostería estructural.
- ICONTEC Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2017). NTC 4076:2017 Unidades de concreto para mampostería no estructural.

- ICONTEC Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2018). NTC 77:2018 Concretos. Método de ensayo para el análisis por tamizado de los agregados finos y gruesos.
- ICONTEC Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2019). NTC 176:2019 Método de ensayo para determinar la densidad relativa (gravedad específica) y la absorción del agregado grueso.
- ICONTEC Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2020a). END 098:2020 Guía para el desarrollo del plan de gestión de residuos para los proyectos de construcción, desmontaje y demolición.
- ICONTEC Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2020b). NTC 237:2020. Método de ensayo para determinar la densidad relativa (gravedad específica) y la absorción del agregado fino.
- ICONTEC Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2020c). NTC 550:2020 Concretos. Elaboración y curado de especímenes de concreto en el sitio de trabajo.
- ICONTEC Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2022). NTC 3829:2022 Adoquín de arcilla para tránsito peatonal y vehicular liviano.
- Iyiola, C. O., Mewomo, M., Oyewole, M., & Makanjuola, S. (2023). Circular Economy for Construction and Waste Demolition: A Bibliometric Review of Research Trends. AHFE 2023 Hawaii Edition. <https://doi.org/10.54941/ahfe1004462>
- Mahpour, A. (2018). Prioritizing barriers to adopt circular economy in construction and demolition waste management. *Resources, Conservation and Recycling*, 134, 216-227. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.01.026>
- Mendes, J. P., Elyseu, F., Nieves, L. J. J., Zaccaron, A., Bernardin, A. M., & Angioletto, E. (2021). Synthesis and characterization of geopolymers using clay ceramic waste as source of aluminosilicate. *Sustainable Materials and Technologies*, 28, e00264. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2021.e00264>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de la República de Colombia. (2017). Resolución 0472 de 2017 Por el cual se reglamenta la gestión integral de los residuos generados en las actividades de construcción y demolición – RCD y se dictan otras disposiciones. <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/10/resolucion-0472-de-2017.pdf>
- Papamichael, I., Voukkali, I., Loizia, P., & Zorpas, A. A. (2023). Construction and demolition waste framework of circular economy: A mini review. *Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy*, 41(12), 1728-1740. <https://doi.org/10.1177/0734242X231190804>
- Sánchez Pacheco, N. (2020). Reutilización de residuos de construcción y demolición (RCD) en la industria de la construcción [Trabajo de grado presentado para optar al título de Especialista en Gerencia Integral de Proyectos, Universidad Militar Nueva Granada]. <https://repository.unimilitar.edu.co/server/api/core/bitstreams/6de3db08-caf6-4022-b220-705ab89dd082/content>
- Singh, N. B., & Middendorf, B. (2020). Geopolymers as an alternative to Portland cement: An overview. *Construction and Building Materials*, 237, 117455. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117455>
- Starczyk-Kołbyk, A., & Małek, M. (2023). Analysis of the Life Cycle and Properties of Concrete with the Addition of Waste Car Glass. *Sustainability*, 15(14), 10836. <https://doi.org/10.3390/su151410836>