

TRABAJO DE GRADO
Opción Investigación o Proyecto de Grado

Comportamiento mecánico a la compresión de concretos con sustitución total del agregado grueso natural por el agregado grueso de los RCD con una relación de 3:1 entre ladrillo y concreto reciclado

Corporación Universitaria Remington.
Área de ingeniería.
Ingeniería civil.

Juan Esteban Ospina Duque
Jorge Eliecer Rentería Ramírez
Robinson Fernando Rúa Patiño
Investigación
2024.

Agradecimientos

Este trabajo de investigación se ha realizado gracias al apoyo financiero de la corporación universitaria Remington, también se debe de agradecer al docente Robinson Fernando Rúa Patiño por su apoyo y aportes importantes durante todo el proceso de este proyecto.

Tabla de contenido

1	Introducción	5
2	Título del proyecto	10
3	Resumen del proyecto	10
	Palabras clave:	11
4	Abstract	11
	Keywords:	11
5	Planteamiento del problema.....	12
6	Objetivos	14
	4.1 Objetivo general	14
	4.2 Objetivos específicos.....	14
7	5. Marco teórico, estado del arte	14
8	Metodología	23
	Tamaño de los agregados gruesos	23
	Granulometría del agregado fino.....	23
	Pesos unitarios y densidades.	24

	3
Ensayo de resistencia al desgaste (NTC 5147)	25
Densidad relativa o y gravedad específica.	25
9 Resultados	26
Granulometría del agregado fino.....	26
Pesos unitarios y densidades.	27
Ensayo de resistencia al desgaste (NTC 5147)	31
Densidad relativa o y gravedad específica.	31
Ensayo de absorción.....	32
Ensayo de resistencia al desgaste	32
Análisis obtenidos de los pesos, densidades y densidad de los agregados.	33
Ensayo a compresión.....	38
Diseño factorial	45
Ensayos químicos	48
10 Conclusiones	51
11 Bibliografía	53

Lista de tablas

Tabla 1 Generación anual de residuos de construcción y demolición en ciudades de Colombia, 2015.....	8
Tabla 3 <i>Granulometría agregado fino.</i>	26

Tabla 4 Pesos obtenidos del agregado de 3/8"	27
Tabla 5 Pesos obtenidos del agregado de 1"	28
Tabla 6 Pesos obtenidos del agregado fino.	29
Tabla 7 Resultado de los cálculos de densidades en el agregado fino.	29
Tabla 8 Resultado de los cálculos de densidades en el agregado grueso 3/8".	30
Tabla 9 Resultado de los cálculos de densidades en el agregado grueso 3/8".	31
Tabla 10 Pesos de los ensayos y peso específico de los agregados.	31
Tabla 11 Ensayo de absorción.	32
Tabla 12 Ensayo al desgaste en concreto con TMN de 1"	33
Tabla 13 Ensayo al desgaste en concreto con TMN de 3/8"	33
Tabla 14 Peso por metro cubico de construcción.	38

Lista de Figuras

Figura 1 Curva granulométrica del agregado fino.	26
Figura 2 Diagrama comparativo entre las densidades de los agregados.....	35
Figura 3 Comparativa entre los ensayos de absorción.....	37
Figura 4 Ensayo a compresión a los 7 días.....	39
Figura 5 Ensayo a compresión a los 7 días.....	42
Figura 6 Ensayo a compresión del agregado de RCD 3/8.	44
Figura 7 Esquema de diseño experimental.	45
Figura 8 Análisis experimental del diagrama de Pareto.	47
Figura 9 (a) distribución acumulativa empírica, (b) densidad de datos.....	48
Figura 10 Imágenes SEM de la muestra de hormigón RCD con una relación agua-cemento de 0,5/reacciones.....	50
Figura 11 Imágenes SEM de la muestra de hormigón RCD con una relación agua-cemento de 0,5/reacciones.....	50

1 Introducción

La economía global se sustenta en pilares fundamentales, entre los que destaca la construcción, sector en continua expansión impulsado por la creciente demanda de vivienda e infraestructura que caracteriza a la sociedad contemporánea. Basado en datos publicados por la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos OECD, (Arimah, 2000), (Schuf, 2023), (Gu, Andreev, & Dupre, 2020). La industria de la construcción representó el 35,2% de la fuerza laboral mundial en edad laboral, y fue el tercero más popular ocupacional categoría después de las industrias manufactureras y de servicios a partir del cuarto trimestre de 2022. (Data.oecd.org, 2019; Flood, 2022)

A pesar de ser una industria vital que avanza desarrollo económico, la construcción tiene efectos perjudiciales sobre el medio ambiente (Güereca, 2017), (Yuan & Shen, 2011). Un proceso altamente contaminante es la fabricación de concreto, la cual contribuye con el 8 % de las emisiones de CO₂ causadas por la actividad humana en el año 2020 (Guo, 2021), Además, se estima que se consumen alrededor de 26000 toneladas métricas de concreto a nivel mundial cada año (Zhang, 2023), (Ram, Serdar, Londono-Zuluaga, & Scrivener, 2023). Este tipo de material, al igual que otros empleados en la realización de proyectos de construcción, produce cantidades significativas de desechos, conocidos como RCDW por sus siglas en inglés Recycling of Construction and Demolition Waste, los cuales pueden representar hasta el 30% de los residuos sólidos generados a nivel global (Wu, Zuo, Yuan, Zillante, & Wang, 2019), (Cheriyen & Choi, 2020).

Para la ingeniería contemporánea, esta situación se convierte en un reto para lograr la sostenibilidad en los proyectos de construcción, lo que impulsa la innovación en la creación de nuevos materiales. Un ejemplo de estas nuevas aplicaciones radica en la técnica de recirculación

de los residuos de construcción y demolición RCDW (Le & Bui, 2020), (Huang, Lin, Chang, & Lin, 2020). En los últimos diez años, se ha investigado extensamente este tema, y algunos estudios han presentado hallazgos sobre la fabricación de concretos que sustituyen parcial o totalmente los agregados gruesos naturales por agregados gruesos provenientes de residuos de construcción y demolición RCDW (Cerqueira, Rangel, Azevedo, & Redentor, 2018), (Cardoza & Colorado, 2022), (Martín-Morales, Zamorano, Ruiz-Moyano, & Valverde-Espinosa, 2011). La construcción requiere vastas cantidades de materiales inertes, como agregados gruesos para concreto, los cuales se obtienen principalmente de depósitos aluviales o mediante explotación minera en zonas montañosas, afectando potencialmente los ecosistemas locales (Kondolf, 1994), (Eng & D, 2009).

Este estudio examina los hallazgos de investigaciones previas que evaluaron el uso de residuos de construcción y demolición RCDW como sustituto total o parcial del agregado grueso natural en la fabricación de concreto. En este estudio, se desarrollaron concretos con resistencia a la compresión de 28 MPa, reemplazando el agregado grueso natural por residuos de construcción y demolición RCDW en una relación 3:1 (tres partes de ladrillo por una parte de concreto). Se empleó un diseño experimental factorial combinado con dos factores y tres niveles cada uno, con el objetivo de promover la reutilización de RCDW en la producción de concretos innovadores.

Justificación

Una edificación sostenible es aquella que se integra armoniosamente con el entorno, utilizando de manera eficiente la energía, el agua y los materiales, y proporcionando confort y salud a quienes la utilizan. Todo esto se logra a través de un proceso de diseño que considera de forma consciente el clima y la ecología del lugar donde se construye el edificio (Área Metropolitana del Valle de Aburrá, & Universidad Pontificia Bolivariana., 2015). Una manera de lograr que los proyectos de construcción sean considerados sostenibles es reducir el consumo de energía en la transformación de materias primas y la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) mediante la gestión de los residuos de construcción y demolición (RCD), reutilizándolos y convirtiéndolos en nuevos materiales para la construcción. En los últimos años, ha habido una tendencia creciente hacia el reciclaje de los desechos producidos por la industria de la construcción, siendo los RCD los más significativos en términos de volumen generado: Considerando el estudio de (Matallana, 2010), la cantidad de residuos de construcción y demolición (RCD) generados en Europa asciende a 180 millones de toneladas al año (sin incluir tierras de excavación y sobrantes de construcción de carreteras). En España, el porcentaje de RCD reutilizados es inferior al 5%, una cifra muy baja en comparación con países como Holanda (90%), Bélgica (87%), Dinamarca (81%) o el Reino Unido (45%). Según la tabla 1, en el Municipio de Medellín, la generación anual de RCD en el año 2011 fue de 1.8 millones de toneladas. (CONPES, 2016): Considerando el estudio de (Bocanumenth-Álvarez, 2004) se calcula que se generan 1,35 metros cúbicos de residuos de construcción por cada metro cuadrado construido. Para estimar la cantidad de RCD en Medellín, se emplearon los datos de las áreas autorizadas para la construcción, detalladas en el Plan de Gestión de Residuos Sólidos (PGIRS)

del Municipio de Medellín en 2015, lo que indica que, en 2023, la generación de RCD alcanzará unos 2,5 millones de toneladas.

Tabla 1

Generación anual de residuos de construcción y demolición en ciudades de Colombia, 2015.

Ciudad	Toneladas	Metros cúbicos
Bogotá	18.314.429	12.287.619
Medellín	1.778.522	1.185.681
Santiago de Cali	1.208.723	908.814
Manizales	459.000	306.000
Cartagena	285.000	190.000
Pereira	90.172	60.115
Ibagué	89.000	59.333
Pasto	24.000	16.000
Barranquilla	18.000	12.000
Neiva	2.900	1.933
San Andrés	292	195

Nota: Información acerca de la cantidad de residuos de construcción y demolición RCD

generados en distintas ciudades de Colombia. Elaboración propia.

A través del CONPES 3874 "Política nacional para la gestión integral de residuos sólidos", se incorpora el concepto de Economía Circular. En noviembre de 2018 se presentó la Estrategia Nacional de la Economía Circular, una iniciativa del Gobierno Nacional destinada a fomentar nuevas modalidades de producción, consumo y gestión de residuos (como reutilización, aprovechamiento, tratamiento, entre otros). (CONPES, 2016). Es factible sustituir o reemplazar parte de los agregados utilizados en la producción de concretos para pavimentos con agregados procedentes de residuos de construcción y demolición (RCD), dada la disponibilidad existente en Colombia. Con un proceso de transformación, los RCD pueden volver a convertirse en un material de construcción que reduce los costos de producción de nuevos concretos y el impacto ambiental de estos residuos. Esto contribuye a la política de economía circular y a la construcción sostenible de pavimentos. El uso de pavimento de concreto, al igual que otras soluciones, se justifica cuando la suma de los costos de construcción y mantenimiento a largo plazo es menor que la de los pavimentos asfálticos. Investigaciones han demostrado que el costo operativo de los vehículos sobre pavimentos de concreto es menor que sobre pavimentos asfálticos, ya que se reduce el consumo de combustible, las distancias de frenado son más cortas y, por ende, los accidentes de tránsito son menos graves. Además, se ha comprobado que el consumo energético para iluminar pavimentos de concreto es menor, lo que genera ahorros significativos a largo plazo, especialmente en áreas urbanas (Murugan, Natarajan, & Chen, 2016).

El avance en la creación de concretos livianos forma parte de las soluciones para contrarrestar el efecto isla de calor ocasionado por los sistemas de pavimentación tradicionales. Estos concretos, al tener una menor densidad y una matriz porosa que aumenta la permeabilidad del agua en comparación con los concretos convencionales, actúan como pavimento fresco,

generando una sensación de frescura en su entorno. Sin embargo, para considerar los concretos livianos como una opción viable en la construcción de pavimentos, es crucial que cumplan con los requisitos de resistencia y durabilidad frente al desgaste por abrasión, requisitos que tanto el concreto de densidad normal como el asfalto satisfacen. Este proyecto se alinea con las prioridades establecidas en los "Planes y Acuerdos Estratégicos Departamentales en Ciencia, Tecnología e Innovación" (PAED), enfocado en el ámbito ambiental para el Departamento de Antioquia. Su desarrollo impactará positivamente el medio ambiente mediante la utilización sostenible de materiales de construcción. Incluye una estrategia ambiental para la construcción sostenible, que busca gestionar racionalmente los recursos para fabricar placas prefabricadas de concreto liviano, permitiendo un uso eficiente de este material analizando sus propiedades físicas, mecánicas y de durabilidad para aplicarlas en la construcción de pavimentos livianos.

2 Título del proyecto

Comportamiento mecánico a la compresión de concretos con sustitución total del agregado grueso natural por el agregado grueso de los RCD con una relación de 3:1 entre ladrillo y concreto reciclado.

3 Resumen del proyecto

El propósito de esta investigación es analizar la respuesta a la compresión de los concretos elaborados con agregado grueso reciclado. Se han formulado mezclas siguiendo las pautas de la norma ACI-211.1-91, sustituyendo por completo el agregado grueso natural por el agregado grueso proveniente de residuos de construcción y demolición con una proporción de 3:1 entre ladrillo y concreto reciclado, utilizando tamaños de 3/8" y 1", y variando las relaciones

agua-cemento entre 0,5, 0,6 y 0,7. Los resultados muestran que al emplear la proporción 3:1 entre ladrillo y concreto reciclado con tamaño de 3/8" y una relación agua-cemento de 0,5, se observa un incremento del 33 % en la resistencia mecánica a la compresión en comparación con los datos presentados en la literatura. Además, se destaca que este tipo de concreto, debido a su baja densidad, puede considerarse como un material liviano.

Palabras clave: concreto reciclado, compresión, resistencia mecánica, agregado grueso, relación agua y cemento.

4 Abstract

The purpose of this research is to analyze the compressive response of concretes made with recycled coarse aggregate. Mixtures have been formulated following the guidelines of the ACI-211.1-91 standard, completely replacing the natural coarse aggregate with the coarse aggregate from construction and demolition waste with a 3:1 ratio between brick and recycled concrete, using sizes of 3/8" and 1", and varying the water-cement ratios between 0.5, 0.6 and 0.7. The results show that when using the 3:1 ratio between brick and recycled concrete with a size of 3/8" and a water-to-cement ratio of 0.5, an increase of 33% in mechanical compressive strength is observed compared to the data presented in the literature. In addition, it is highlighted that this type of concrete, due to its low density, can be considered a lightweight material.

Keywords: recycled concrete, compression, mechanical strength, coarse aggregate, water and cement ratio.

5 Planteamiento del problema

La construcción es un pilar básico de la economía en nuestro país, ya que, mediante la edificación de viviendas y obras de infraestructura civil como carreteras, puentes, túneles y represas, contribuye a elevar el nivel de vida de los habitantes y estimular el progreso y expansión económica de Colombia.

Uno de los resultados de la gran necesidad de construcción es la producción de cantidades importantes de desechos de construcción y demolición (RCD, por sus siglas en inglés Recycling of Construction and Demolition Waste), los cuales han surgido como un importante desafío ambiental. Estos residuos constituyen hasta el 30% de los desechos sólidos producidos a nivel global. (Pacheco Bustos, Fuentes Pumarejo, Sánchez Cotte, & Rondón Quintana, 2017)

En Colombia y en varios países, los sistemas constructivos predominantes para pavimentos son el sistema rígido (concreto) y el flexible (asfalto). Estos materiales de construcción contribuyen al fenómeno de la isla de calor urbana (UHIE en inglés) debido a su capacidad de retener calor por más tiempo que las superficies naturales cubiertas de vegetación. Esta característica térmica del concreto y el asfalto provoca variaciones de temperatura significativas durante las primeras horas de la noche, cuando liberan la energía acumulada durante el día, elevando la temperatura en áreas urbanas varios grados por encima de lo habitual. (Palacios C. , 2019)

El asfalto y los techos oscuros pueden absorber más calor, siendo el asfalto un material derivado del petróleo, un recurso que se agota rápidamente. Esto resalta la importancia del concreto como material fundamental para el futuro de los pavimentos.

Entre las características de los concretos livianos están su baja densidad, permeabilidad, capacidades de aislamiento térmico y acústico y un rendimiento mecánico inferior. Estas propiedades están influenciadas por el tipo de agregado utilizado, los aditivos y las variaciones en la mezcla. (Vargas, Restrepo-Baena, & Tobón, 2017). Las características empleadas para medir la eficiencia de los pavimentos incluyen la resistencia a la flexión o módulo de rotura, la resistencia a compresión y la resistencia al desgaste por abrasión.

En el departamento de Antioquia y en Colombia, no se han investigado las propiedades mecánicas y la durabilidad de concretos livianos elaborados con agregados reciclados, especialmente en lo que respecta a los compuestos resultantes de su uso. Esta carencia se debe a que el empleo de agregados reciclados no está estandarizado, ya que se trata de un material para la elaboración de concreto que no se produce en grandes cantidades como los agregados convencionales.

Con base en lo mencionado, surge la posibilidad de responder a la interrogante: ¿Cómo afecta el uso de agregados reciclados en la resistencia a la flexión y al desgaste de concretos livianos destinados a la construcción sostenible de pavimentos livianos?

6 Objetivos

4.1 Objetivo general

Relacionar las características mecánicas y de resistencia al desgaste de un concreto liviano elaborado con agregados reciclados, para usarlo como pavimento en el desarrollo de estructuras sostenibles.

4.2 Objetivos específicos

- Analizar las características físicas y mineralógicas de los agregados reciclados que influyen en la resistencia a la abrasión de los concretos livianos.
- Investigar la transferencia de carga en losas de concreto con agregados livianos, para valorar la durabilidad mediante el desgaste del concreto liviano.
- Establecer una relación entre los índices de desgaste y el módulo de rotura de las losas de concreto liviano, y determinar el tipo de tráfico compatible con el pavimento de concreto liviano.

7 5. Marco teórico, estado del arte

El concreto es un material sólido, heterogéneo y permeable que se encuentra embebido en una matriz de pasta de cemento hidratado (HCP). Está conformado por agregados finos y gruesos con diversas distribuciones de tamaño de partículas y composiciones mineralógicas. La matriz endurecida es el resultado de las reacciones de hidratación entre el material cementante y el agua. En la actualidad, los concretos suelen incorporar fibras de acero, vidrio, materiales sintéticos o fibras naturales; materiales puzolánicos como cenizas volantes, humo de sílice o escoria de alto

horno; y aditivos químicos. Cambios en las propiedades específicas de los materiales que lo conforman, como los agregados, pueden provocar variaciones en la resistencia a la compresión, resistencia a la flexión y durabilidad del concreto. (Vargas Samboni, 2016).

El concreto liviano (LWC, por sus siglas en inglés), puede ser elaborado al reemplazar parcial o totalmente los agregados finos o gruesos en la mezcla, lo que posibilita una disminución en la densidad del concreto. Estos agregados alternativos pueden obtenerse mediante la utilización de residuos de construcción y demolición (RCD), materiales poliméricos reciclados, o agregados artificiales como esquisto o arcilla expandida.

De acuerdo con la norma ACI 213R-03, los concretos estructurales livianos deben presentar una resistencia a compresión mínima de 17,2 MPa y una densidad en estado seco que oscile entre 1680 y 1920 kg/m³. Por consiguiente, esta clasificación puede ser subdividida en base a la relación entre resistencia y densidad, y las propiedades y aplicaciones del concreto estarán restringidas por las características de las materias primas utilizadas.

- Con una densidad de entre 300 y 800 kg/m³, este tipo de concreto es liviano y destaca por su gran capacidad de aislamiento térmico pese a su resistencia mecánica.
- Con una densidad de entre 800 y 1200 kg/m³, este tipo de concreto es liviano y tiene una resistencia mecánica moderada.
- Los concretos con una densidad entre 1200 y 1800 kg/m³ son menos densos y con capacidad de aislamiento térmico reducida.

El crecimiento acelerado de la demanda en la industria de la construcción de unidades prefabricadas ha generado la necesidad de investigar nuevos materiales de construcción innovadores. El concreto liviano se ha incorporado en la fabricación de paneles prefabricados, ofreciendo ventajas como reducir la carga en las cimentaciones, disminuir el tamaño de los elementos estructurales, acelerar en los tiempos de construcción, controlar mejor la calidad del material y crear entornos para edificaciones ecológicas. Ejemplos como el edificio One Prudential Plaza en Chicago y el puente Nordhordland en Noruega destacan por el uso de concreto liviano estructural. Sin embargo, el uso de concreto liviano de alta resistencia estructural se ve limitado por la falta de investigaciones sobre sus propiedades de durabilidad a largo plazo, ya que éstas pueden variar dependiendo del tipo y las características de los agregados utilizados en este tipo de concretos. (Lo & Cui, 2002).

Como alternativa ecológica en infraestructura, han surgido los pavimentos de concreto permeable (PCP), los cuales pueden ser empleados para complementar o sustituir la infraestructura tradicional de concreto, especialmente en carreteras y áreas de estacionamiento de baja velocidad y poco tráfico. Entre sus beneficios se encuentran la reducción del escurrimiento superficial y la promoción de la infiltración del agua de lluvia, el aumento de la resistencia al deslizamiento de la superficie, la mejora de la calidad del agua subterránea, la disminución del riesgo de hidroplaneo, la mitigación del efecto isla de calor y la atenuación del ruido del tráfico. Estos aspectos pueden contribuir a fortalecer la resiliencia, el cuidado ambiental y la seguridad vial en sistemas de transporte locales (Xie, Akin, & Shi, 2019).

Algunas limitaciones de este pavimento abarcan el desgaste anticipado o la degradación por factores químicos y físicos, y la posible obstrucción de los poros por la acumulación de sedimentos provenientes del agua de lluvia o por el colapso de los poros por el tráfico vehicular.

La evaluación del rendimiento mecánico de los pavimentos de concreto permeable PCP incluye la medición de la resistencia a la compresión. Debido a la naturaleza porosa de este tipo de concretos, su resistencia varía en comparación con la del concreto convencional, principalmente porque no existen normativas específicas para los PCP, (Xie, Akin, & Shi, 2019)

Los pavimentos de asfalto usan asfalto como aglutinante, un subproducto refinado del petróleo crudo. Por ende, el costo de este tipo de pavimento está sujeto a la fluctuación del precio internacional del petróleo. Dado que las reservas de petróleo son limitadas, los diseñadores viales buscan mejorar la tecnología de construcción de estas superficies, dando origen al "sistema de pavimento de bloques de concreto" (CBP en inglés) o adoquines, como se les conoce en Colombia. Este sistema se basa en el concepto de los antiguos "pavimentos de piedra", que han perdurado por siglos en todo el mundo (Mampearachchi, 2019).

Existen numerosos beneficios del pavimento de adoquines en comparación con otras técnicas de pavimentación, tales como:

- Proceso constructivo sencillo
- Posibilidad de realizar reparaciones subterráneas.
- Durabilidad prolongada de la superficie.
- Posibilidad de reutilización.
- Sin impacto negativo en la temperatura
- Capacidad de habilitar el tráfico inmediatamente después de la construcción o reparación.
- Garantía de control de calidad elevado
- Aumento en la flexibilidad elástica
- Gran capacidad de resistencia al deslizamiento
- Requerimientos de mantenimiento reducidos.

Sin embargo, entre las limitaciones de este sistema se encuentra su alto costo, ya que la capa de rodadura está compuesta únicamente por adoquines, lo que implica la necesidad de garantizar una calidad controlada en la preparación de la subbase y base, así como el costo adicional de los bordes de protección en concreto.

- No es recomendable para vías donde el límite de velocidad es superior a 70 km/h debido al ruido elevado y la vibración.

- Requiere bordes restringidos o líneas de bordillo.
- La instalación manual requiere más tiempo

En la evaluación de las propiedades mecánicas, se encontró que el rendimiento relacionado con la carga de los pavimentos de bloques no dependía principalmente de la resistencia a la compresión de los bloques. Este hallazgo fue confirmado por Panda y Ghosh (2002) en un experimento donde utilizaron tres tipos de bloques de tamaño idéntico, fabricados con diferentes mezclas de concreto para lograr distintas resistencias a la compresión. A pesar de que las áreas de fricción eran iguales para los tres tipos de bloques, cada bloque individual fue sometido a compresión con una carga de flexión insignificante debido a su reducido tamaño. El módulo elástico de los bloques de concreto era considerablemente mayor que el de los materiales subyacentes. Estos bloques se comportaron como cuerpos rígidos en el pavimento, transmitiendo la carga externa a los bloques y capas adyacentes, principalmente por sus características geométricas en lugar de su resistencia. Por tanto, Panda y Ghosh concluyeron que el desempeño bajo carga de los pavimentos de bloques era independiente de la resistencia a la compresión de los bloques. (Echaveguren, 2013).

Los residuos de construcción y demolición constituyen aproximadamente el 25-30% del total de residuos generados en España. Existe una necesidad evidente de incrementar el índice de reciclaje y alcanzar cifras similares a las de otros países europeos como Holanda, Bélgica o Dinamarca, donde se recicla alrededor del 80% de los RCD.

Los hallazgos del estudio realizado por Rodríguez y colaboradores en 2017 demuestran la viabilidad de utilizar residuos de construcción y demolición (RCD) para la fabricación de bloques de pavimento a escala industrial en España. En la investigación se analizaron tres tipos de agregados reciclados: residuos de concreto (CA), residuos de mampostería (MA) provenientes de una empresa productora de ladrillos, y un agregado mixto reciclado (RMA) derivado del tratamiento de RCD.

Se elaboraron varias muestras de bloques de pavimento con reemplazo del 15% y 30% de los agregados reciclados en dos tamaños de partícula, 0,3 mm y 0,5 mm. Los resultados de resistencia a compresión alcanzaron alrededor de 3.5 MPa, valor mínimo requerido por la norma UNE EN 1338 para los bloques de pavimento (adoquines). Respecto a la resistencia a compresión y flexión, se observó que los agregados de mampostería provocaron una mayor disminución en la resistencia a los 90 días, con una pérdida del 41% al reemplazar el CA.

Estos resultados confirman la importancia de la composición del agregado reciclado en las propiedades mecánicas del concreto. En el caso de los agregados reciclados RMA, se observa que tienden a absorber agua de la mezcla de concreto, lo que genera un efecto de "autocurado" que puede mejorar las propiedades mecánicas de los bloques de pavimento (PB), según lo mencionado por Rodríguez y colaboradores en 2017.

Sin embargo, un factor perjudicial a considerar en los PB con RMA es la formación de ettringita, debido a las altas concentraciones de sulfato presentes en dichos agregados. Esta situación puede controlarse a nivel industrial sin riesgo de deterioro de los adoquines, manteniendo el contenido de sulfato dentro de los límites permitidos ($<0,8\%$, con relación al peso del cemento) establecidos en la norma EHE-08 (Rodríguez, y otros, 2017).

El uso de agregados reciclados en la producción de morteros livianos para la construcción ha demostrado ser una alternativa viable para contribuir al desarrollo sostenible. (Vargas, Restrepo-Baena, & Tobón, 2017).

En cuanto a las características de los áridos reciclados, se observa que su desempeño es menor que los agregados naturales. Factores como la absorción de agua, la proporción de partículas finas, la presencia de mortero adherido, el contenido de azufre y la existencia de impurezas son determinantes en la calidad final de los materiales reciclados (Muñoz-Ruiperez, Rodríguez, Gutiérrez-González, & Calderón).

El estudio de (Çelik & Atis, 2002) Se investigó la resistencia a la abrasión de concreto para pavimentos con agregado de piedra caliza y adición de cenizas volantes (HVFA) utilizando la máquina Dorry según las normas británicas. Los resultados mostraron una relación lineal entre la abrasión y la resistencia a compresión, pero también revelaron que la resistencia a la abrasión mejora cuando aumenta la resistencia a flexión. Esto se debe a que, durante la prueba de abrasión, el deslizamiento de las partículas de arena sobre la superficie del concreto genera esfuerzos de cizalla, lo que provoca la fractura de algunas partículas. Dado que la cizalla implica esfuerzos de tracción, la correlación se evalúa mediante la prueba de resistencia a flexión, que es un ensayo de tracción indirecta.

La resistencia a la abrasión también se ha estudiado mediante la alteración de la composición de la matriz cementante (Yoshitake, Ueno, Ushio, Arano, & Fukumoto, 2016); Se

llevó a cabo un estudio sobre concreto modificado con cenizas volantes recicladas (en proporciones del 20%, 40% y 44%) y polvo de roca caliza. Los resultados mostraron que la abrasión aumenta significativamente con el incremento de cenizas volantes (hasta 44%), mientras que el concreto sin adiciones presentó un desgaste mínimo. Sin embargo, la resistencia a flexión no se vio afectada por la adición de cenizas volantes (hasta 40%). Esto sugiere que la resistencia a la abrasión está influenciada por la rigidez de la matriz de mortero y la rigidez del agregado grueso. Aunque los resultados indicaron un desgaste por abrasión máximo inferior al valor de diseño establecido para pavimentos de asfalto (130 mm²), este tipo de concreto podría ser una opción viable para la fabricación de pavimentos.

Según la ACI 213R, al igual que el concreto tradicional, la resistencia a la abrasión de los concretos livianos crece en proporción a su resistencia a la compresión. Sin embargo, cuando la matriz del concreto liviano se desgasta y se exponen las partículas del agregado liviano, su deterioro se acelera. Para mejorar la resistencia a la abrasión, se puede combinar un agregado grueso de baja densidad con un agregado fino natural y aplicar tratamientos de superficie adecuados (Bate, 1979).

Considerando las características específicas de los concretos para pavimentos de densidad convencional, y las similitudes relevantes con los concretos livianos definidos por la ACI 213R, es fundamental realizar un estudio detallado de la relación entre la resistencia a flexión y la resistencia al desgaste en concretos livianos. Este estudio permitiría evaluar su potencial aplicación en la fabricación de adoquines para pavimentos de baja densidad, lo que podría generar importantes beneficios en términos de sostenibilidad y eficiencia en la construcción de infraestructuras.

8 Metodología

A continuación, se describe el procedimiento para evaluar la resistencia del concreto con reemplazo total de los agregados gruesos por materiales reciclados de construcción y demolición (RCD), siguiendo las características de los agregados establecidas en las normas INVIAS y NTC.

Tamaño de los agregados gruesos

En esta investigación, se seleccionaron dos tamaños específicos de agregado: 3/8" y 1". Es importante destacar que todas las muestras se analizaron exclusivamente en función del peso retenido en estas dos dimensiones. El propósito de este enfoque fue simplificar la manipulación y el análisis de las muestras, minimizando al mismo tiempo el riesgo de errores. Al utilizar estas dimensiones específicas, se buscó garantizar la consistencia y precisión de los resultados en la evaluación del comportamiento mecánico del concreto con sustitución total del agregado grueso natural por RCD, lo que permitió una evaluación más rigurosa.

Granulometría del agregado fino

El objetivo de este ensayo es determinar la distribución de tamaños de partículas en una muestra, lo que permite evaluar la granulometría de los agregados utilizados en la mezcla de concreto, proyectos de construcción, geotecnia e investigación de suelos. Los resultados obtenidos permiten verificar si la distribución de tamaños de partículas cumple con los requisitos especificados y proporcionan información esencial para controlar la producción. Para cumplir con los estándares de la norma INVIAS, es necesario seguir una serie de pasos durante la realización de este ensayo, lo que garantiza la precisión y confiabilidad de los resultados.

- Se porciona la muestra elegida en 4 partes.
- Es necesario lavar y tamizar la muestra sobre el tamiz #200 para eliminar cualquier natural fino que pueda influir negativamente la resistencia de la mezcla.

- Luego de completar el paso anterior se deberá secar el material en un horno a 110°C.
- Se debe tamizar sobre un tiempo de 8 minutos entre los siguientes tamices: (#4, #8, #16, #30, #50, #100, #200.)

Pesos unitarios y densidades.

En resumen, el ensayo de peso unitario mide el volumen de las partículas de los agregados y el espacio entre ellas, expresado en kg/m³. Se puede aplicar a agregados finos y gruesos, en estado suelto, compacto o apisonado. Otro aspecto crucial es el volumen de vacíos entre las partículas, que indica el espacio no ocupado por el material sólido. Este informe sigue la norma ASTM C29/C29M-09, que incluye la recopilación de datos, análisis y obtención de resultados a través de ensayos. El objetivo es determinar la densidad a granel o peso unitario de los agregados, evaluando sus propiedades de dureza y resistencia para la preparación de concreto. A continuación, se describe el procedimiento detallado para realizar este ensayo.

- Se selecciona un cilindro medidor adecuado según el tamaño máximo nominal (TMN) del agregado, en este caso, un cilindro de 0.0046 m³ de capacidad para un TMN de 1" y 3/8"
- Luego, se toma una muestra siguiendo la práctica ASTM D75 y se reduce a un tamaño aproximado de 125% a 200% del volumen requerido en el cilindro
- Para determinar el peso unitario suelto, se registra el peso y volumen del cilindro vacío, luego se llena con material sin compactar y se pesa
- Para el peso unitario compactado por gravedad, se llena el cilindro en tres etapas, dejando caer uno de los extremos 25 veces en cada etapa, y luego se pesa.

- Para el peso unitario por apisonado, se sigue un procedimiento similar, pero se apisona el material con una varilla 25 veces en cada etapa en lugar de dejar caer el cilindro.

Ensayo de resistencia al desgaste (NTC 5147)

Este ensayo evalúa la resistencia al desgaste de la capa superficial de un elemento o la capa de rodadura. Consiste en un disco metálico de 7 cm de ancho que se presiona contra la superficie a analizar, mientras se vierte un flujo controlado de arena como material abrasivo en el centro del disco. Después de 75 rotaciones en 60 segundos, el disco deja una marca rectangular en la muestra. Este ensayo es aplicable a materiales para pavimentos y pisos, como adoquines y losetas de concreto, y está regulado por la norma NTC 5147.

Densidad relativa o y gravedad específica.

La norma INV-E-223-13 describe el procedimiento para determinar con precisión la densidad promedio, densidad relativa de partículas y absorción del agregado grueso. La densidad relativa es crucial en el cálculo del volumen ocupado por el agregado en mezclas como concreto hidráulico y asfáltico. El proceso de preparación de la muestra implica tamizar el material a través de un tamiz No. 4, lavarlo para eliminar el polvo y luego sumergirlo en agua durante 24 horas. Después, se deja reposar la muestra en un paño absorbente hasta alcanzar un estado saturado y superficialmente seco (SSS). Luego, se determina la masa en aire y se mide la masa aparente en agua, eliminando el aire atrapado al sumergir la muestra. Finalmente, se seca la muestra en un horno a $110\pm 5^{\circ}\text{C}$ y se enfría para determinar su masa y realizar cálculos. Los resultados de estos ensayos permiten obtener el peso específico del agregado grueso.

- **SSS:** Peso saturado superficialmente seco.

- **SMS:** Peso sumergido.
- **PE:** Peso específico del agregado.

9 Resultados

Granulometría del agregado fino

A continuación, en la **Tabla 3** se muestran los resultados obtenidos durante la prueba de laboratorio, los cuales según la normatividad del INVIAS tienen un porcentaje de tolerancia del 4% para material mineral fino y así cumplen con la normatividad.

Tabla 2

Granulometría agregado fino.

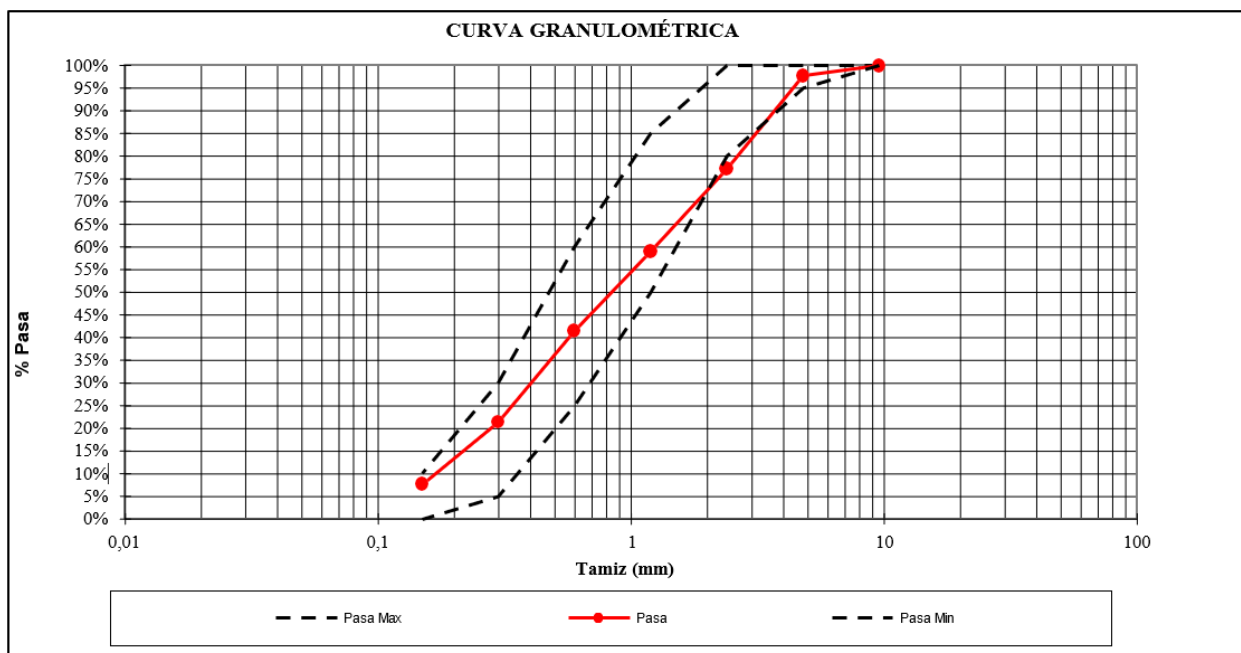
Tamiz	Retenido (g)	Pasa Max	Pasa	Pasa Min
N° 4	61,5	100%	98%	95%
N° 8	571,2	100%	77%	80%
N° 16	505,2	85%	59%	50%
N° 30	486,9	60%	41%	25%
N° 50	557,1	30%	21%	5%
No100	381	10%	8%	0%
Fondo	147,5			
Total	2710,4			

Nota. se realizó la prueba con un peso inicial de 2800g. Elaboración propia.

En la **figura 1** se exhiben los datos obtenidos de la **tabla 3**. Este procedimiento se fundamentó en las normas establecidas por la normativa INVIAS. En esta curva granulométrica se puede apreciar que se encuentra en los límites establecidos y cumple con los límites de tolerancia del 4%.

Figura 1

Curva granulométrica del agregado fino.



Nota. Se aprecia la curva granulométrica la cual se ajusta a los límites impuestos por las curvas que proporciona por la norma. Elaboración propia.

Pesos unitarios y densidades.

A continuación, en la **tabla 4** se presentan los resultados de los pesos obtenidos en los ensayos de densidad realizados mediante los tres métodos: suelto, compactado y apisonado. Para calcular la densidad ideal para realizar el diseño de mezcla para los tamaños 3/8", estos valores ayudan a determinar la densidad ideal necesaria para la preparación de las mezclas de concreto hidráulico.

Tabla 3

Pesos obtenidos del agregado de 3/8".

z	# Ensayo	Peso unitario suelto (kg)	Peso unitario apisonado (kg)	Peso unitario compacto (kg)
RCD 3/8"	1	3,97	4,20	4,45
	2	3,92	4,23	4,50

	3	3,98	4,21	4,47
	Promedio	3,96	4,21	4,47
Modelo 3/8"	1	7,08	7,16	7,73
	2	7,10	7,17	7,84
	3	7,11	7,20	7,95
	Promedio	7,10	7,18	7,84

Nota: datos que nos ayudaran calcular las densidades del agregado de 3/8. Elaboración propia.

A continuación, en la **tabla 5** se presentan los resultados de los pesos obtenidos en los ensayos de densidad realizados mediante los tres métodos: suelto, compactado y apisonado. Para calcular la densidad ideal para realizar el diseño de mezcla para los tamaños 3/8", estos valores ayudan a determinar la densidad ideal necesaria para la preparación de las mezclas de concreto hidráulico.

Tabla 4

Pesos obtenidos del agregado de 1"

Tipo	# Ensayo	Peso unitario suelto (kg)	Peso unitario apisonado (kg)	Peso unitario compacto (kg)
RCD 1"	1	3,78	4,10	4,48
	2	3,84	4,17	4,52
	3	3,82	4,12	4,47
	Promedio	3,81	4,13	4,49
Modelo 1"	1	7,22	7,32	7,94
	2	7,23	7,33	7,94
	3	7,23	7,32	7,94
	Promedio	7,23	7,32	7,94

Nota: datos que nos ayudaran calcular las densidades del agregado de 3/8. Elaboración propia.

A continuación, en la **tabla 6** se presentan los resultados de los pesos obtenidos en los ensayos de densidad realizados mediante los tres métodos: suelto, compactado y apisonado.

Estos valores ayudan en la determinación de la densidad ideal para realizar el diseño de mezcla para el agregado fino, así como para la preparación de las mezclas de concreto hidráulico.

Tabla 5

Pesos obtenidos del agregado fino.

Tipo	# Ensayo	Peso unitario suelto (kg)	Peso unitario apisonado (kg)	Peso unitario compacto (kg)
Arena	1	7,68	7,82	8,47
	2	7,67	7,85	8,45
	3	7,68	7,87	8,43
	Promedio	7,68	7,85	8,45

Nota: datos que nos ayudaran calcular las densidades del agregado fino. Elaboración propia.

Los resultados de los cálculos para calcular las densidades con diferentes técnicas se muestran en la **tabla 7**. Se utilizará el promedio de los resultados de los tres ensayos (suelto, compactado y apisonado) para los agregados finos, ya que es el valor con el que se obtuvo más confiabilidad con respecto a los demás.

Tabla 6

Resultado de los cálculos de densidades en el agregado fino.

Tipo	Ensayo (P.U)	Densidad (kg/m ³)
Arena	Suelto	1660
	Compacto	1697
	Apisonado	1827
	Promedio	1728

Nota: Pesos unitarios de la arena (suelto, compacto y apisonado). Elaboración propia.

Los resultados de los cálculos para calcular las densidades con diferentes técnicas se muestran en la **tabla 8**. Se utilizará el promedio de los resultados de los tres ensayos (suelto,

compactado y apisonado) para los agregados finos, ya que es el valor con el que se obtuvo más confiabilidad con respecto a los demás.

Tabla 7

Resultado de los cálculos de densidades en el agregado grueso 3/8”.

Tipo	# Ensayo (P.U)	Densidad (kg/m³)
RCD 3/8"	Suelto	860
	Compacto	910
	Apisonado	970
	Promedio	910
Modelo 3/8"	Suelto	1534
	Compacto	1552
	Apisonado	1695
	Promedio	1594

Nota: Pesos unitarios del agregado de 3/8” (suelto, compacto y apisonado). Elaboración propia

Los resultados de los cálculos para calcular las densidades con diferentes técnicas se muestran en la **tabla 9**. Se utilizará el promedio de los resultados de los tres ensayos (suelto, compactado y apisonado) para el agregado grueso de 1, ya que es el valor con el que se obtuvo más confiabilidad con respecto a los demás.

Tabla 8

Resultado de los cálculos de densidades en el agregado grueso 3/8".

Tipo	# Ensayo (P.U)	Densidad (kg/m³)
RCD 1"	Suelto	820
	Compacto	890
	Apisonado	970
	Promedio	910
Modelo 1"	Suelto	1562
	Compacto	1583
	Apisonado	1717
	Promedio	1621

Nota: Pesos unitarios del agregado de 1" (suelto, compacto y apisonado). Elaboración propia.

Ensayo de resistencia al desgaste (NTC 5147)

La **tabla 10** muestra los resultados de los ensayos de desgaste; la siguiente tabla muestra la relación entre el tamaño del agregado, en este caso de 1" para el remplazo de RCD y la muestra modelo, así como la relación entre agua y cemento, respectivamente.

Densidad relativa o y gravedad específica.

Tabla 9

Pesos de los ensayos y peso específico de los agregados.

Ensayo	RCD 3/8"	RCD 1"	Modelo 3/8"	Modelo 1"
SSS (g)	2310	4630	2038	4064
SMS (g)	1210	2440	1289	2565
PE (kg/m³)	2100	2114	2720	2710

Nota: Resultado del peso específico sobre los agregados gruesos para posterior diseño. Elaboración propia.

Ensayo de absorción

Para lograr una manejabilidad ideal y mantener la relación agua-cemento (A/C) del diseño en el caso de un concreto con agregados de arcilla, es fundamental realizar un ensayo de absorción.

Los resultados de los ensayos de absorción de los agregados gruesos se pueden apreciar en la **tabla 11**.

Donde, para obtener la absorción se entiende según sus siglas a los siguientes ensayos:

- **SSS:** Peso saturado superficialmente seco.
- **SH:** Peso secado al horno.
- **ANS:** Absorción.

Tabla 10

Ensayo de absorción.

Test	RCD 3/8"	RCD 1"	modelo 3/8"	modelo 1"
SH (g)	2000	4000	2000	4000
SSS (g)	2310	4630	2038	4064
ABS (%)	16	16	1,9	1,6

Nota: cálculo de la absorción generado por los diferentes tipos de agregados grupos. Elaboración propia.

Ensayo de resistencia al desgaste

En la **tabla 12** se exhiben los resultados obtenidos tras la realización de los ensayos de desgaste. En la tabla siguiente se puede observar la correlación existente entre el tamaño de agregado, en este caso de 1, tanto para el remplazo de RCD como para la muestra modelo, y la correlación entre agua y cemento.

Tabla 11

Ensayo al desgaste en concreto con TMN de 1".

# Ensayo	RCD 1"			Modelo 1"		
	A/C	0,5	0,6	0,7	0,5	0,6
1	29,70	30,75	34,50	29,10	29,90	33,05
2	30,45	31,50	33,70	30,20	30,45	32,85
Promedio	30,075	31,125	34,100	29,650	30,175	32,950

Nota: los datos obtenidos del ensayo hacen referencia al desgaste por fricción en la capa exterior del elemento. Elaboración propia.

La **tabla 13** muestra los resultados de los ensayos de desgaste; la siguiente tabla muestra la relación entre el tamaño del agregado, en este caso de 3/8" para el remplazo de RCD y para la muestra modelo, así como la relación entre agua y cemento.

Tabla 12

Ensayo al desgaste en concreto con TMN de 3/8".

# Ensayo	RCD 3/8"			Modelo 3/8"		
	A/C	0,5	0,6	0,7	0,5	0,6
1	30,05	31,70	35,45	29,60	31,90	35,45
2	30,80	32,50	34,20	30,20	32,60	34,20
Promedio	30,425	32,100	34,825	29,900	32,250	34,825

Nota: los datos obtenidos del ensayo hacen referencia al desgaste por fricción en la capa exterior del elemento (las unidades son en mm). Elaboración propia.

Análisis obtenidos de los pesos, densidades y densidad de los agregados.

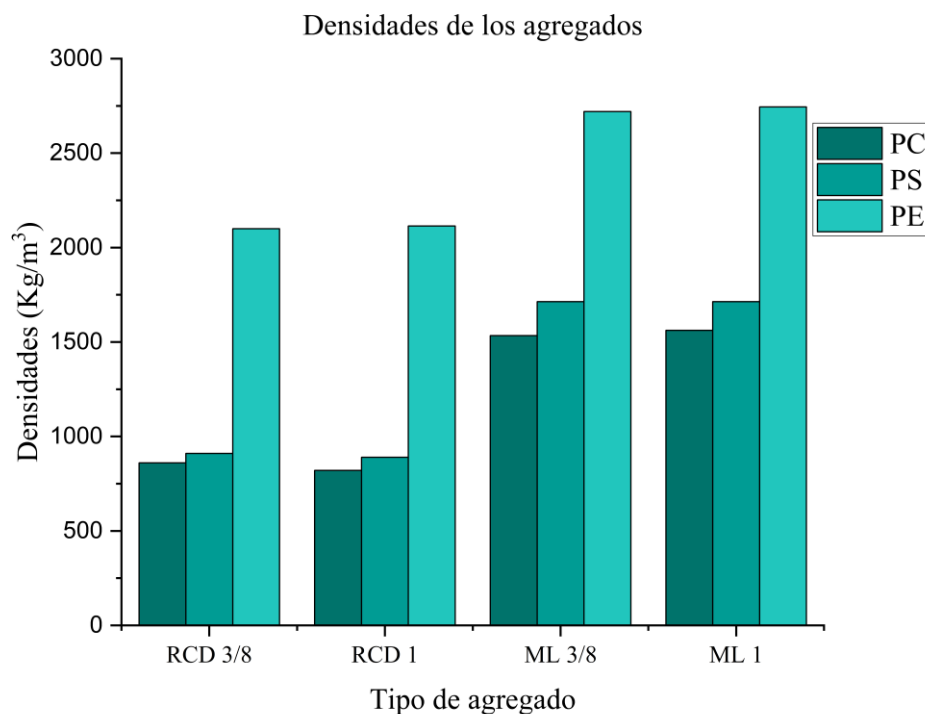
Se desarrollaron dos mezclas con un diseño de 28 MPa. Uno estaba elaborado con árido grueso natural y el otro con árido grueso RCD. La proporción de ladrillo a concreto reciclado fue de 3:1, respectivamente, que son los parámetros especificados en ACI-211.1. -91. Las muestras de hormigón con árido grueso natural se denominan ML y las muestras de hormigón con árido

grueso procedente de residuos de construcción se denominan RCD. Los dos tipos de agregados que componen las muestras de concreto serán sometidos a pruebas de densidad y absorción de agua según ASTM C33/33M:2023 y ASTM C127:2015, y finalmente una prueba de tamiz según ASTM C136/. C136M:2019 para determinar el tamaño de partícula.

En La **Figura 3** muestra la densidad del agregado grueso natural y del agregado grueso RCD obtenidos mediante pruebas de laboratorio. De esto, podemos concluir que la densidad de PE del agregado grueso RCD es un 25% menor que la del agregado grueso natural, mientras que el peso unitario cúbico de PS y el peso unitario de compresión de PC son menores que los del agregado grueso natural en comparación con. Agregados naturales a granel. Los totales fueron 48,6% y 46,7% respectivamente. De los resultados obtenidos es posible afirmar que los agregados de los RCD que conforman las muestras RCD son mucho más livianos debido a su naturaleza porosa lo que implica que los concretos fabricados a partir de este agregado presentaran una menor densidad.

Figura 2

Diagrama comparativo entre las densidades de los agregados.



Nota: Se expresa con mayor precisión la diferencia entre la densidad de los áridos basados en elementos RCD y el predominio del material arcilloso frente al material derivado de rocas.

Elaboración propia.

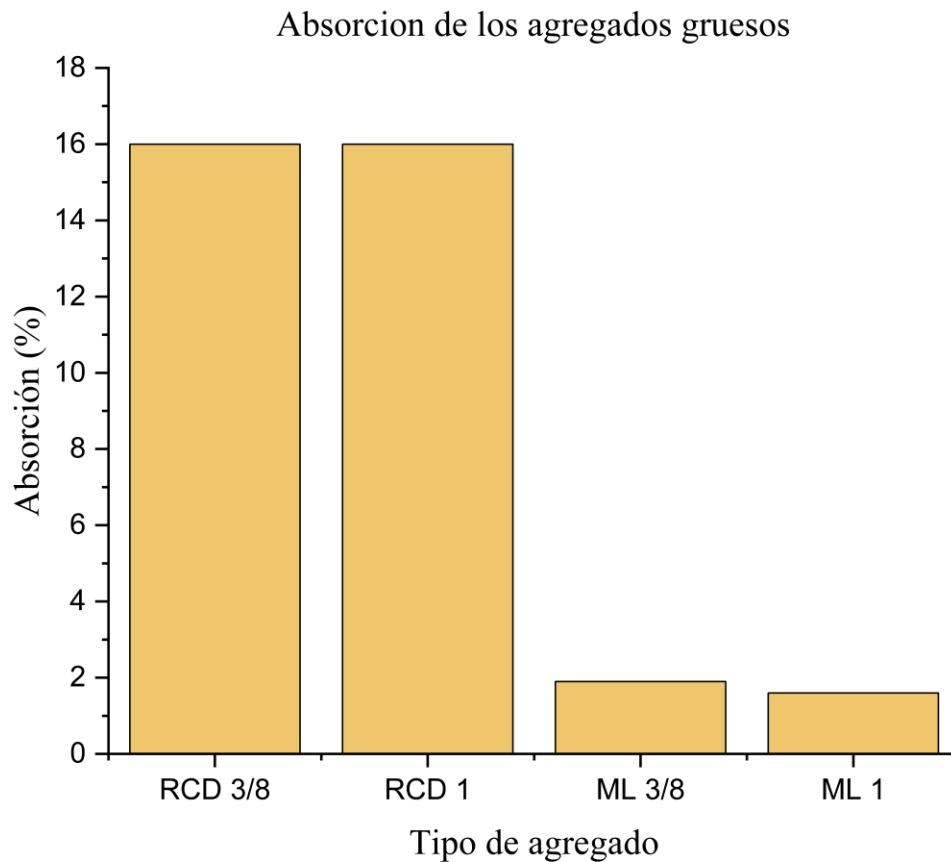
Como se identifica en el gráfico anterior, los agregados grandes de RCD que componen la muestra de concreto ML tienen un peso menor que los agregados naturales grandes que componen la muestra de concreto ML, pero la Figura 4 nos permite observar que la capacidad de absorción de agua de El árido grande RCD es un 87,5% superior al del árido grande natural. Dado que contiene una cantidad significativa de material arcilloso procedente de áridos de ladrillo y la

porosidad del hormigón reciclado, se dice que la capacidad de absorción del árido es significativa en comparación con los áridos naturales.

La absorción de agregados RCD es significativa y no realizar las correcciones apropiadas de agua en el diseño de la mezcla de concreto reemplazando todos los agregados gruesos podría afectar las variables del estudio. Aunque ACI 211.1-91 indica el procedimiento adecuado para usar correcciones de humedad y absorción, incluidas correcciones por exceso y déficit de agua, estas correcciones no son suficientemente efectivas. El agregado absorbe agua a una tasa variable de casi el 16%, lo que puede afectar la relación agua-cemento. Para evitar este problema, se decidió reducir la absorbencia del árido a un nivel de absorción más manejable similar al de los materiales a base de piedra. . Este proceso implica saturar parcialmente la molienda, aproximadamente 2 minutos, lo que reduce el 16% a aproximadamente 2-3%.

Figura 3

Comparativa entre los ensayos de absorción.



Nota: Se ilustra el aumento de la absorción del agua y humedad de los agregados a base de arcilla frente a los provenientes de origen pétreos. Elaboración propia.

La mezcla diseñada con una resistencia de 28 MPa según los parámetros establecidos en ACI-211.1 se produjo con agregado grueso natural y la mezcla restante con agregado grueso RCDW en una proporción de 3:1 respectivamente ladrillo y concreto reciclado. El siguiente peso por metro cúbico se informa en la Tabla 14. Esto muestra que las muestras de concreto con agregado grueso RCD mostraron una reducción de densidad del 46,1 % al 43,2 % para el agregado RCD 1" y 3/8"; correspondiente. Estos resultados nos permiten confirmar que el hormigón RCD es un hormigón ligero.

Tabla 13

Peso por metro cubico de construcción.

Tipo de agregado	ML 3/8"	RCD 3/8"	ML 1"	RCD 1"
Pesos (Kg/m ³)	1114	600	2250	1279
reducción (%)	46,1		43,2	

Nota: Se aprecia la reducción del peso por metro cubico (m3) de construcción en comparativa entre un agregado en base a RCD y otro en origen de material pétreo. Elaboración propia.

Ensayo a compresión

Las muestras de concreto MI y RCD se rompieron en compresión los días 7 y 28, para poder evaluar las resistencias inicial y última variando el tamaño de agregado y la relación agua-cemento según lo establecido en el plan experimental. Es así como se determina en el cuadro presentado que el concreto de agregado grueso natural se denomina ML y la muestra de concreto de agregado grande RCD se denomina RCD.

La **Figura 5** muestra los resultados de resistencia obtenidos después de 7 días. El gráfico presentado nos permite observar que las muestras de concreto ML son las muestras iniciales con

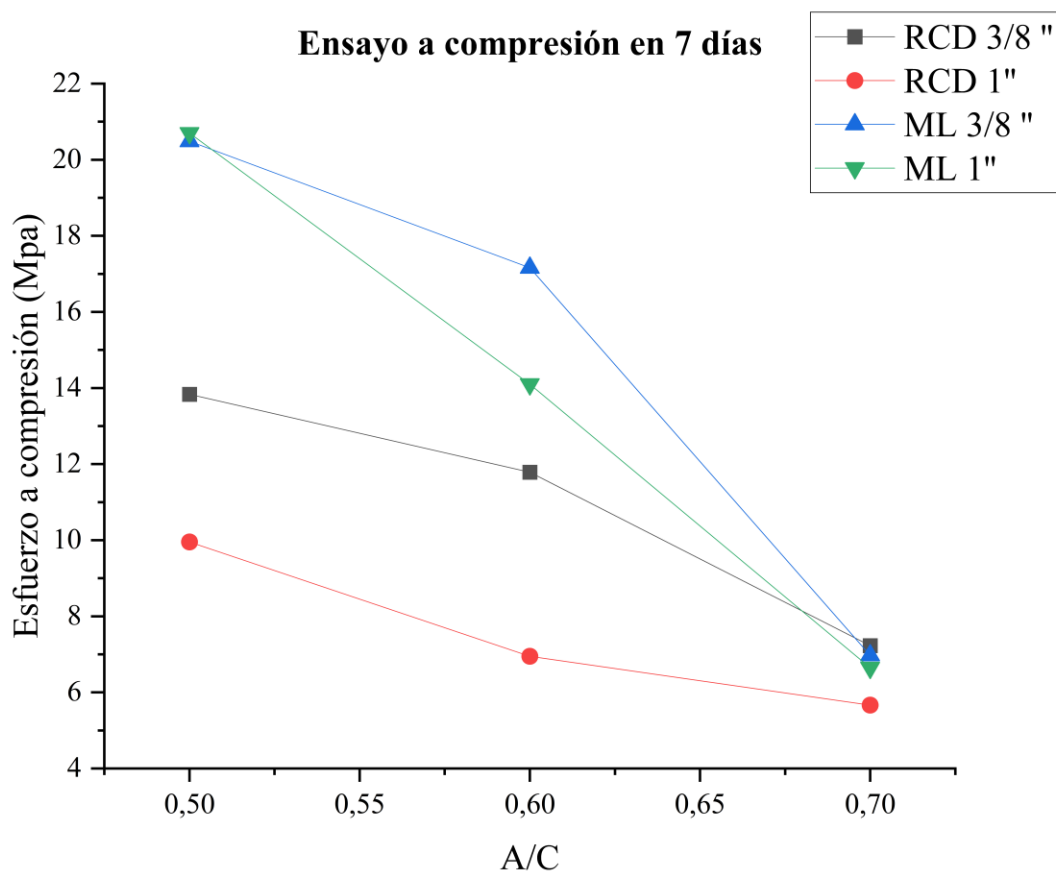
mejores propiedades mecánicas. Del gráfico también se puede decir que las muestras de concreto ML presentan una relación inversa entre el tamaño del agregado y la resistencia, ya que se observa que cuanto menor sea el tamaño del agregado, la muestra exhibirá una mejor condición mecánica. También se puede inferir que si la relación agua-cemento está entre 0,51 y 0,69, el tamaño del agregado de la muestra de concreto ML puede afectar la resistencia inicial.

Las muestras de concreto de RCD que presentaron un mejor comportamiento fueron la de la relación agua cemento de 0,5 que alcanzaron el 35 % y el 66,7 % para agregados de 1" y 3/8" estando por debajo de las muestras de control en un 38 % y 8% respectivamente. Una posible explicación para los hallazgos es que las muestras de concreto RCD se fabricaron a partir de agregados gruesos con un RCD de 1" y 3/8"; Debido a la forma y textura irregular, la superficie de contacto entre la matriz de cemento y las caras del agregado no se adhiere adecuadamente mecánica y químicamente, creando huecos que actúan como precursores de falla, además, a esta edad tan temprana solo 50 % - 70 % de la resistencia que corresponde a la reacción del silicato tricálcico C_3S .

La relación inversa entre el tamaño del agregado y la resistencia a la compresión también ocurre en muestras de concreto RCD, en las que cuanto menor es el tamaño del agregado, mejor es la resistencia, debido a que el número de superficies de contacto entre los agregados y la matriz de cemento es menor. debido a la menor circunferencia del agregado. superficies del árido, puede haber mayor continuidad de la matriz del cemento, lo que produce una reducción de las líneas de fractura que pueden reducir la resistencia.

Figura 4

Ensayo a compresión a los 7 días.



Nota: grafica representativa sobre el comportamiento de los diferentes tipos de concretos frente a un cambio en la relación agua y cemento (A/C) y los días que han transcurridos desde su desencofrado.

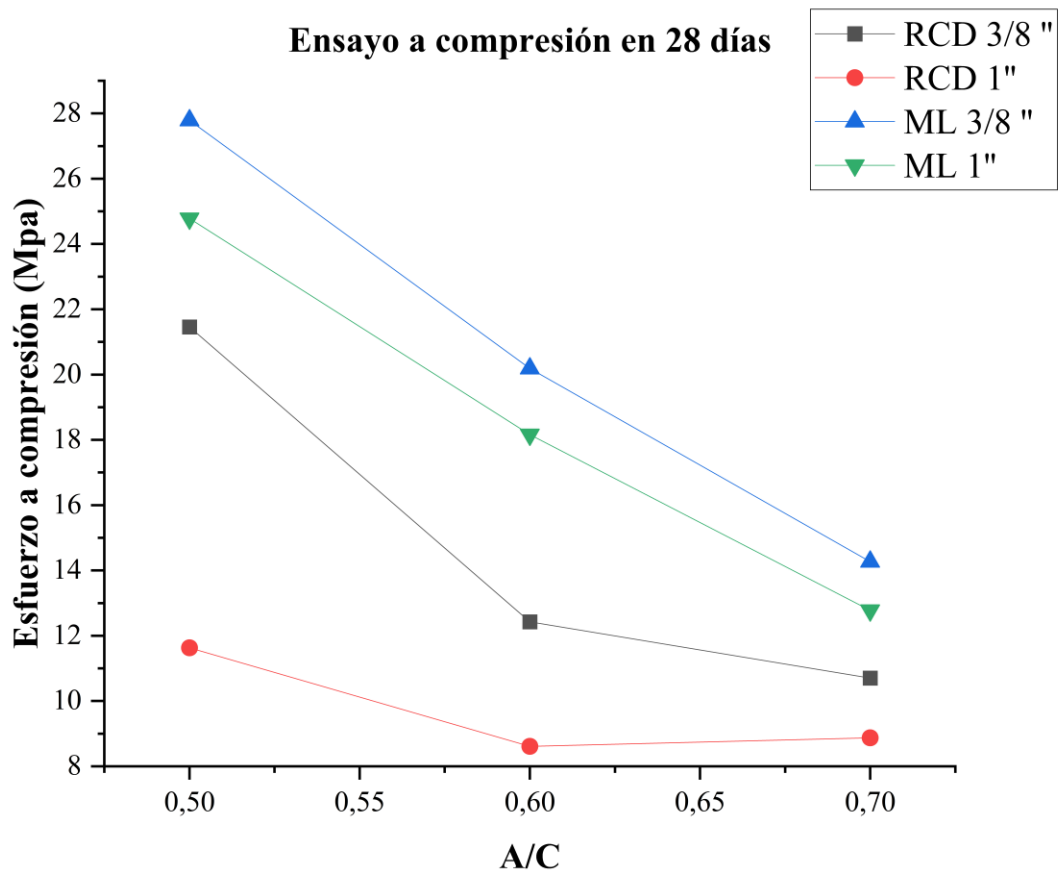
En La **Figura 6** presenta los resultados de las muestras de concreto RCD y MI de estallido por compresión el día 28. Del gráfico presentado se puede concluir que la muestra de control ML de 3/8" con una relación agua-cemento de 0.5 había alcanzado el nivel de diseño. resistencia, mientras que otras muestras de control con relación agua-cemento con el mismo tipo de agregado no alcanzaron la resistencia de diseño. Una muestra de concreto ML de 1 pulgada con una relación agua-cemento de 0,5 alcanzó el 89,3 % de su resistencia máxima durante el mismo período de tiempo. El resto del gráfico nos permite observar que la muestra de concreto ML de 1 pulgada tuvo una tasa de variación similar a la muestra de concreto ML de 3/8 de pulgada, pero aun así fue un 11,3 % más baja que el promedio.

La muestra de concreto RCD con agregado grueso de 1" y 3/8" con una relación agua-cemento de 0,5 tiene las mejores propiedades mecánicas, logrando resistencias de 12 MPa y 21,5 MPa, equivalentes a 42,9 % y 78,5 % de la resistencia de diseño a 28 días. Mientras que otras relaciones agua-cemento y tamaños de agregados en muestras de concreto RCD no exceden el 50% de la resistencia de diseño en la misma secuencia de tiempo. De los gráficos de la Figura 8, podemos inferir que entre 0,5 y 0,6 tiene una tasa de cambio mayor que la curva entre 0,6 y 0,7, que tiene una pendiente más suave, esto se debe a la relación inversa entre la resistencia a la compresión y la. Tamaño total del RCD, es mucho más sensible a cambios de fuerza entre 0,5 y 0,6.

También se puede concluir que, en las edades finales, la resistencia a la compresión de las muestras de concreto hechas con MI y las muestras de concreto hechas con RCD no solo varía dependiendo de la relación agua-cemento sino que también depende del tamaño del agregado, fenómeno que no ocurre para muestras de concreto hechas de MI porque a relaciones agua-cemento de 0,5 - 0,7 en edades tempranas, la resistencia no cambia dependiendo del tamaño del agregado.

Figura 5

Ensayo a compresión a los 7 días.



Nota: grafica representativa sobre el comportamiento de los diferentes tipos de concretos frente a un cambio en la relación agua y cemento (A/C) y los días que han transcurridos desde su desencofrado.

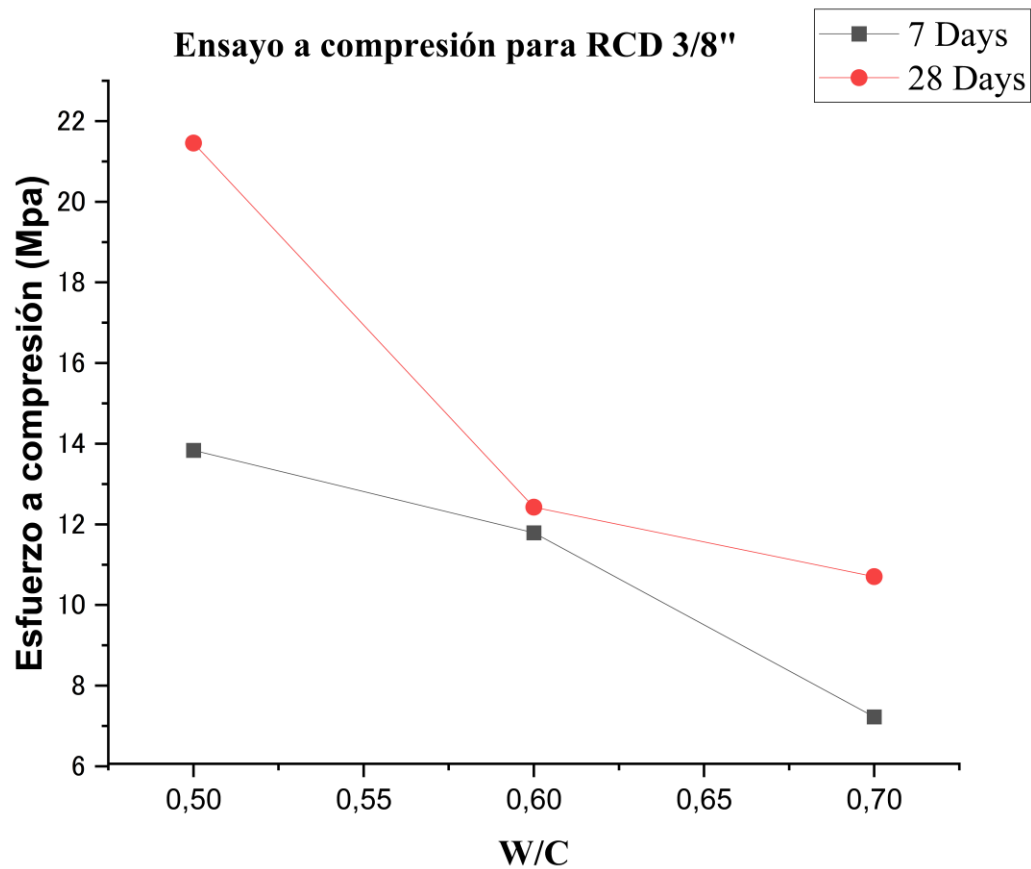
De los resultados experimentales presentados en la en la Figura 9 es posible establecer que los concretos con agregado grueso con RCD de 3/8" tuvieron el mejor comportamiento mecánico. La explicación del resultado se fundamenta en que debido al menor tamaño del agregado se presenta una menor cara externa lo cual disminuye notablemente la interfaz de contacto del agregado con la matriz cementante, permitiendo una mayor continuidad del material cementante y disminuyendo las zonas falla que se dan en las interfaces por la condición porosa del agregado.

De las diferentes muestras de concretos fabricados con agregados grueso de RCD 3/8" se puede concluir que la relación agua cemento de 0,7 presento el más bajo comportamiento alcanzado el 39,3 % de la resistencia de diseño a los 28 días, mientras que las muestras con relación agua cemento de 0,6 alcanzó el 56, 6 % en el mismo periodo de tiempo. Una posible explicación a este fenómeno donde las muestras no superaran el 60 % de la resistencia de diseño se debe a que la relación agua cemento no permitido el desarrollo adecuado del gel Silicato de Calcio Hidratado $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ para el refinamiento de poros que mejorara la interfase de agregado matriz cementante y su resistencia a la compresión de las muestras.

Mientras que la relación agua cemento del 0,5 fue la de mejor comportamiento respecto a las muestras modelo, ya que a los 28 días alcance el 78,5 % de la resistencia de diseño conservando características de un concreto liviano. El que no alcanzara la resistencia posiblemente se deba a que el agregado RCD puede ser considerado deficiente por su alta absorción, se ha encontrado que la interacción química de las partículas de RCD con la pasta de cemento puede conducir a una disminución en la fuerza de la adherencia entre éstas y los productos hidratados de cemento, además que a edades tempranas, la hidratación del cemento produce una gran cantidad de poros en la zona de interfase, lo que provoca una fuerza de adherencia débil.

Figura 6

Ensayo a compresión del agregado de RCD 3/8.



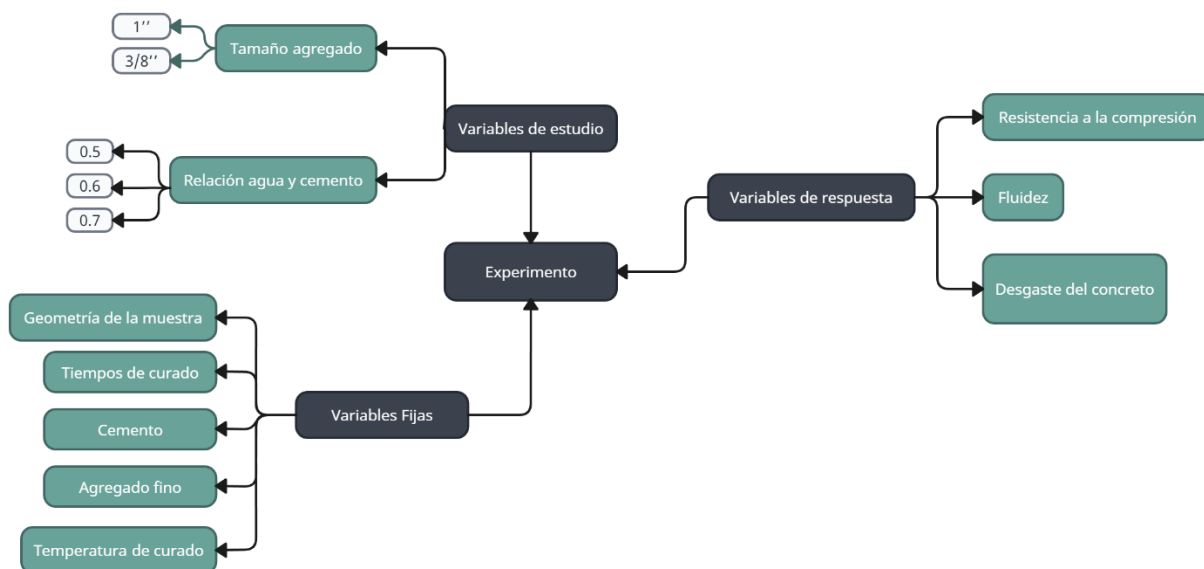
Nota: grafica representativa sobre el comportamiento del agregado de RCD 3/8" frente a un cambio en la relación agua y cemento (A/C) y los días que han transcurridos desde su desencofrado.

Diseño factorial

Para el diseño experimental se propuso un modelo estadístico factorial combinado en el que el primer factor es el tamaño del agregado, presentado con dos niveles de 1" y 3/8" el segundo factor corresponde a la relación agua-cemento, el cual es presentado con tres niveles 0,5 - 0,6 y 0,7. Las variables categóricas del diseño experimental son valores extraídos de diversos resultados reportados en la literatura que presentan un comportamiento mecánico aceptable. En el diseño experimental, también se considera que las variables fijas representan condiciones uniformes que permiten la creación de puntos de control para obtener resultados confiables. La **Figura 8** muestra el diagrama del diseño experimental basado en las variables de estudio, variables fijas y variables de respuesta.

Figura 7

Esquema de diseño experimental.



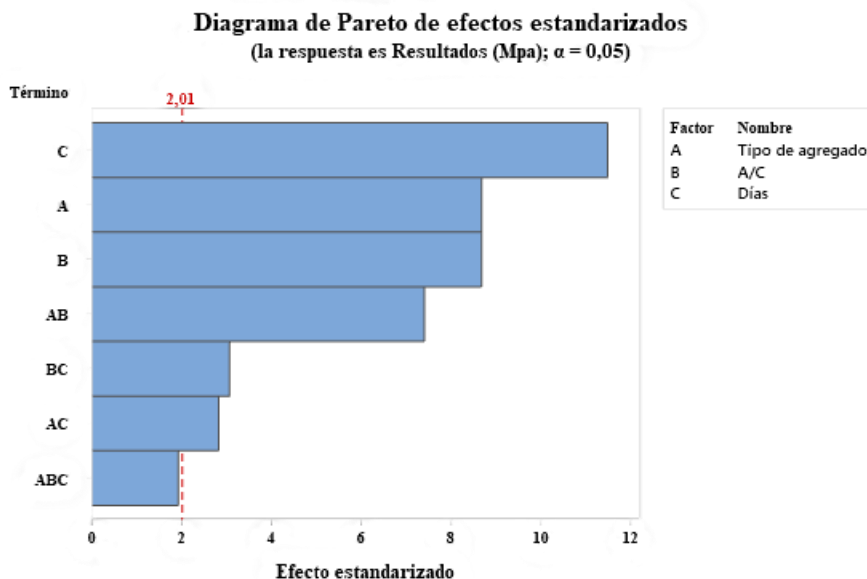
Nota: proceso que se llevara a cabo para el diseño experimental. Elaboración propia.

La prueba consiste en fabricar muestras de hormigón según parámetros de investigación y luego probar su resistencia a la compresión. Las muestras fabricadas reemplazaron los agregados gruesos naturales por los RCDW de 1" y 3/8" en una proporción de ladrillo a concreto de 3:1, con proporciones de agua-cemento de 0,5 y 0,6, y 0,7. Los modelos también se elaboraron con agregados naturales gruesos de 1" y 3/8" y variar la relación agua-cemento entre 0,5 - 0,6 y 0,7.

Del modelo estadístico propuesto para el análisis experimental extraemos un diagrama de Pareto que nos permite determinar qué interacciones son importantes y cuáles no. Cualquier interacción encontrada después de la línea de puntos roja será significativa, pero las anteriores no, como se muestra en la **Figura 9**. De esta manera, se puede confirmar que los resultados obtenidos en el experimento son significativos cuando las variables tamaño de agregado, relación agua-cemento y tiempo de prueba de compresión de la muestra interfieren con los resultados.

Figura 8

Análisis experimental del diagrama de Pareto.



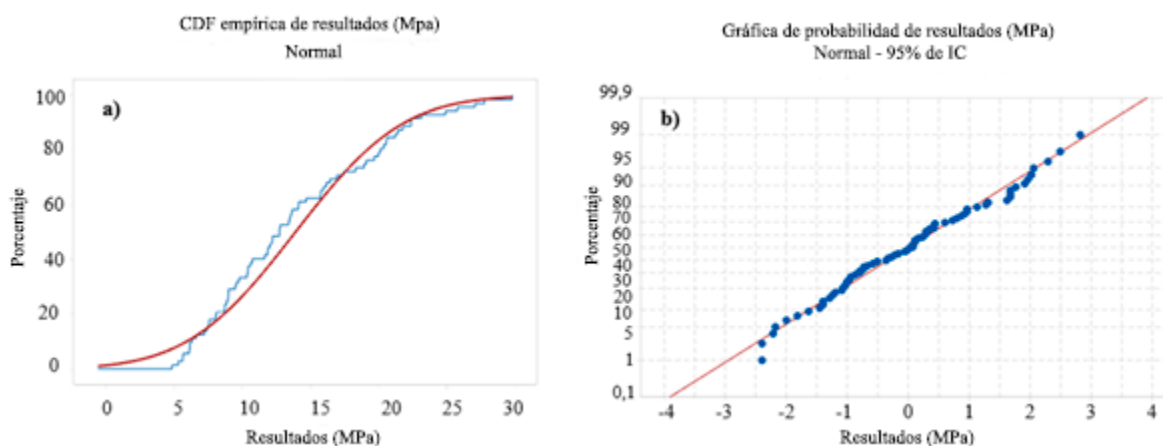
Nota: Análisis de datos que permiten identificar las variables que afectan significativamente en la resistencia del concreto. Elaboración propia.

La **Figura 10** muestra el histograma (a), que muestra en el eje horizontal la distribución y acumulación de los resultados obtenidos en los ensayos de resistencia a la compresión en MPa y en el eje de ordenadas el avance acumulado de los datos obtenidos expresados en porcentaje. En el gráfico se puede ver que los datos obtenidos durante el desarrollo del modelo de investigación experimental se ajustan con precisión, esto se puede confirmar porque la curva de distribución de ajuste sigue la distribución acumulativa, que es una escalera. Si bien el gráfico (b) muestra la densidad de datos en orden de ejecución en relación con los resultados y el progreso acumulado de los datos expresado como porcentaje, de este gráfico (b) se puede concluir que los puntos de

ejecución de la prueba exhiben un comportamiento normalizado. Los gráficos presentados nos permiten confirmar que los resultados obtenidos cuando se pueden intervenir las

Figura 9

(a) distribución acumulativa empírica, (b) densidad de datos.



Nota: Estos gráficos demuestran que los datos obtenidos de las pruebas de laboratorio son confiables porque la dispersión de los datos permanece por debajo del estándar mínimo. Elaboración propia.

Ensayos químicos

La microestructura de una muestra de concreto RCD con una relación agua-cemento de 0.5 con agregado grueso RCD de 3/8" se muestra en la **Figura 11-12**, donde se realizó el análisis SEM/EDS. Podemos ver en la **Figura 11** que la porosidad se presenta en la interfaz entre la matriz de cemento y el agregado, pero también observamos que donde hay menos agregado la microestructura es densa y más uniforme. La **Figura 12** muestra el espectro EDX de dos puntos de una muestra de concreto RCD con una relación agua-cemento de 0.5 con agregado grueso RCD de 3/8", lo que nos permite observar la disminución en el contenido de calcio que puede disminuir la velocidad de reacción. Debido a la estructura del agregado, a pesar de que se ha

saturado, aún no es suficiente realizar el proceso de difusión, en el cual los iones Ca^{2+} se desplazan a lugares de menor concentración para obtener una distribución uniforme de iones para que no se desplacen. afectar el proceso de detección de poros. de gel de silicato de sodio hidratado C-S-HLa **Figura 12** muestra el espectro EDX de dos puntos de una muestra de concreto RCD con una relación agua-cemento de 0.5 con agregado grueso RCD de 3/8", lo que nos permite observar una disminución de calcio. El contenido puede disminuir la velocidad de reacción. Debido a la estructura del agregado, a pesar de que se ha saturado, aún no es suficiente realizar el proceso de difusión, en el cual los iones Ca^{2+} se desplazan a lugares de menor concentración para obtener una distribución uniforme de iones para que no se desplacen. afectar el proceso de detección de poros. de gel C-S-H.La microestructura de una muestra de concreto RCD con una relación agua-cemento de 0,5 con agregado grueso RCD de 3/8" se muestra en la **Figura 11-12**, donde se realizó el análisis SEM/EDS. Podemos ver en la **Figura 11** que la porosidad se presenta en la interfaz entre la matriz de cemento y el agregado, pero también observamos que donde hay menos agregado la microestructura es densa y más uniforme. La **Figura 12** muestra el espectro EDX de dos puntos de una muestra de concreto RCD con una relación agua-cemento de 0.5 con agregado grueso RCD de 3/8", lo que nos permite observar la disminución en el contenido de calcio que puede disminuir la velocidad de reacción. Debido a la estructura del agregado, a pesar de que se ha saturado, aún no es suficiente realizar el proceso de difusión, en el cual los iones Ca^{2+} se desplazan a lugares de menor concentración para obtener una distribución uniforme de iones para que no se desplacen. afectar el proceso de detección de poros. de gel de silicato de sodio hidratado C-S-HLa **Figura 12** muestra el espectro EDX de dos puntos de una muestra de concreto RCD con una relación agua-cemento de 0.5 con agregado grueso RCD de 3/8", lo que nos permite observar una disminución de calcio. El contenido puede

disminuir la velocidad de reacción. Debido a la estructura del agregado, a pesar de que se ha saturado, aún no es suficiente realizar el proceso de difusión, en el cual los iones Ca^{2+} se desplazan a lugares de menor concentración para obtener una distribución uniforme de iones para que no lo hagan. afectar el proceso de detección de poros. de gel C-S-H.

Figura 10

Imágenes SEM de la muestra de hormigón RCD con una relación agua-cemento de 0,5/reacciones.

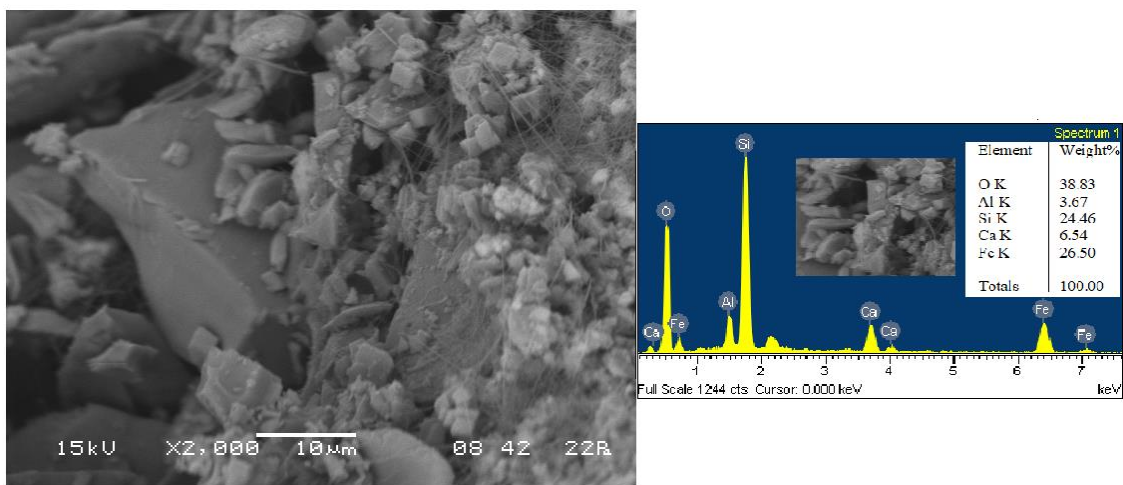
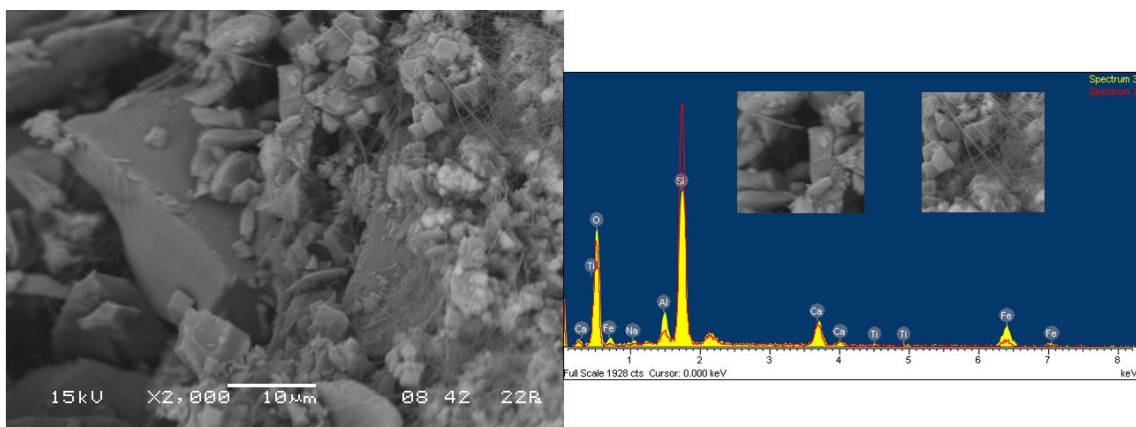


Figura 11

Imágenes SEM de la muestra de hormigón RCD con una relación agua-cemento de 0,5/reacciones.



10 Conclusiones

El desarrollo de concreto nuevo con reemplazo parcial o completo de agregados naturales grandes por agregados RCDW grandes ha dado como resultado la conclusión de que:

- Estudios anteriores informaron un reemplazo del 100% de agregados naturales grandes por una mezcla heterogénea de agregados RCDW grandes. El hormigón y los ladrillos reciclados tienen una resistencia a la compresión reducida en aproximadamente un 30%. Además, este tipo de hormigón tiene una densidad un 11,1% superior a la del hormigón elaborado a partir de grandes áridos naturales. Si bien reemplazar los ladrillos reciclados con agregado RCDW en bruto reduce la densidad del concreto hasta 3 veces, crea un déficit significativo en la resistencia a la compresión última del material. Además, la literatura recomienda que el valor de reposición óptimo para agregados naturales grandes sea como máximo del 55%, ya que por encima de este valor hay una reducción de más del 30% en la resistencia última a la compresión.
- Diseño de hormigón RCD 3/8"; propuestas en este estudio se obtuvieron mejoras respecto a los resultados reportados en la literatura, ya que con el 100% de reemplazo de agregados grandes, la resistencia a la compresión se logró solo el 21.5% de la resistencia última, finalmente se logró una mejora del 33% en el 100%. mezcla. Reemplace el agregado grueso natural con agregado grueso RCDW. Además de reducir la densidad del hormigón al 46,1%, significa que es un hormigón ligero.

- Estos resultados se obtuvieron como se mencionó para la mejor muestra de investigación correspondiente a concreto RCD con agregado de 3/8; espesor de RCDW con una relación de 3:1 entre ladrillo y hormigón respectivamente, además de una relación agua-cemento de 0,5. La mejora del 33% en sus propiedades mecánicas al comprimirse se explica porque el tamaño del agregado crea una menor superficie de contacto con la pasta de cemento, permitiendo que la pasta de cemento tenga alta continuidad y el material se comporte como un sistema más homogéneo. Además del tratamiento de saturación de los agregados de ladrillo y concreto RCDW para no afectar la relación agua-cemento de 0.5 y las reacciones resultantes de esta condición. Ser capaz de mejorar este proceso de saturación de agregados puede mejorar la respuesta de compresión mecánica del concreto RCD.
- Los resultados encontrados durante el desarrollo de este estudio son interesantes ya que se logró una mejora del 33 % en el concreto al reemplazar completamente el agregado grueso natural con agregado grueso RCDW y, si es correcto, la resistencia a la falla de diseño de 28 MPa es solo un 21,5 % menor, lo que nos permite concluir que en la dirección de la sustitución de materiales, el agregado grueso es un resultado importante, lo que también nos permite abrir una dirección de investigación sobre este material es construir otros materiales de sistemas estructurales que no tengan propiedades estructurales pero que requieran relativamente altas fuerza mecánica.

11 Bibliografía

- Aamer Rafique Bhutta, M., Hasanah, N., Farhayu, N., Hussin, M. W., Tahir, M. B., & Mirza, J. (2013). Properties of porous concrete from waste crushed concrete (recycled aggregate). *Constr Build Mater.*
- Área Metropolitana del Valle de Aburrá, & Universidad Pontificia Bolivariana. (2015). *Política Pública de Construcción Sostenible.*
- Arimah, B. (2000). Housing-sector Performance in Global Perspective: A Cross-city Investigation. *Urban Studies*, 37.
- Bate. (1979). *Guide for structural lightweight aggregate concrete: report of ACI committee 213.* *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete.*
- Bocanumenth-Álvarez. (2004). *Especialista en manejo de escombros, generación de escombros para el Valle de Aburrá.*
- Bravo, M., Brito, J., Pontes, J., & Evangelista, L. (2015). Durability performance of concrete with recycled aggregates from construction and demolition waste plants. *Constr Build Mater.*
- Bravo, M., Brito, J., Pontes, J., & Evangelista, L. (2015). Mechanical performance of concrete made with aggregates from construction and demolition waste recycling plants. *J Clean Prod.*
- Cardoza, A., & Colorado, H. A. (2022). Geopolymers Made of Construction and Demolition Waste : Current Trends and Perspectives,.

Çelik, O., & Atis, C. (2002). *Relation between abrasion resistance and flexural strength of high volume fly ash concrete. Materials and Structures/Materiaux et Constructions*. Obtenido de <https://doi.org/10.1617/13827>

Cerqueira, N., Rangel, A., Azevedo, G., & Redentor, F. (2018). Evaluation of the Quality of Concrete with Waste of Construction and Demolition.

Cheriyana, D., & Choi, J. (2020). A review of research on particulate matter pollution in the construction industry. *J Clean Prod*.

CONPES. (2016). *Politica Nacional Para La Gestión Integral De Residuos Solidos. Departamento Nacional de Planeación*. Obtenido de <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Económicos/3874.pdf>

Data.oecd.org. (2019). Labour productivity and utilisation. Obtenido de <https://data.oecd.org/lprdy/labour-productivity-and-utilisation.htm>

Echaveguren. (2013). Manual de diseño de pavimentos de adoquines de hormigon. *The British Journal of Psychiatry*. doi:<https://doi.org/10.1192/bjp>

Eng, & D, P. (2009). Negative and Positive Effects of the Exploitation of Gravel-Sand Anna KOWALSKA 1) , Wiktoria SOBCZYK 2) 1) Engineering and Mineral Processing; without affiliation 2).

Flood, J. (junio de 2022). Urban and Housing Indicators Urban and Housing Indicators. doi:10.1080/0042098975385.

- González, J. S., Gayarre, F. L., Pérez, C. L., Ros, P. S., & López, M. A. (2017). Influence of recycled brick aggregates on properties of structural concrete for manufacturing precast prestressed beams. *Constr Build Mater.*
- Gu, D., Andreev, K., & Dupre, M. E. (2020). Major Trends in Population Growth Around the World Continuing Growth of the World Population at a Slowing Pace.
- Güereca, L. P. (2017). Evaluación comparativa de los impactos ambientales de la producción de clínker con combustible fósil frente a combustible derivado de los residuos municipales. *UNAM.*
- Guo, R. (2021). Global CO₂ uptake by cement from 1930 to 2019,.
- Huang, W. L., Lin, D. H., Chang, N. B., & Lin, K. S. (2020). Recycling of construction and demolition waste via a mechanical sorting process. Obtenido de www.elsevier.com/locate/resconrec
- Jian, S. M., & Wu, B. (2021). Compressive behavior of compound concrete containing demolished concrete lumps and recycled aggregate concrete. *Constr Build Mater.*
- Kondolf, G. M. (1994). Geomorphic and environmental effects of instream gravel mining,.
- Le, H., & Bui, Q. (2020). Recycled aggregate concretes – A state-of-the-art from the microstructure to the structural performance. *Constr Build Mater.*
- Lo, T. Y., & Cui, H. (2002). Properties of lightweight aggregate for lightweight concrete production. *Advances in Building Technology, Vols I and II, Proceedings.*
- Mampearachchi. (2019). Handbook on Concrete Block Paving. *Handbook on Concrete Block Paving*. doi:<https://doi.org/10.1007/978-981-13-8417-2>

- Martín-Morales, M., Zamorano, M., Ruiz-Moyano, A., & Valverde-Espinosa, I. (2011). Characterization of recycled aggregates construction and demolition waste for concrete production following the Spanish Structural Concrete Code EHE-08. *Constr Build Mater.*
- Matallana. (2010). Gestión de residuos de construcción y demolición. Obtenido de <https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/13681>
- Muñoz-Ruiperez, c., Rodríguez, A., Gutiérrez-González, & Calderón, V. (s.f.). Lightweight masonry mortars made with expanded clay and recycled aggregates. Construction and Building Materials. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.065>
- Murugan, R., Natarajan, C., & Chen, S. (2016). Material development for a sustainable precast concrete block pavement. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jtte.2016.09.001>
- Nepomuceno, M. C., Isidoro, R. A., & Catarino, J. P. (2018). Mechanical performance evaluation of concrete made with recycled ceramic coarse aggregates from industrial brick waste. ,” *Constr Build Mate.*
- Pacheco Bustos, C. A., Fuentes Pumarejo, L. G., Sánchez Cotte, E. H., & Rondón Quintana, H. A. (2017). Residuos de construcción y demolición (RCD), una perspectiva de aprovechamiento para la ciudad de barranquilla desde su modelo de gestión .
- Palacios, & C. A. (2019). Medidas de adaptación/mitigación ante islas de calor en el valle de Aburrá. *Universidad EIA.*
- Palacios, C. (2019). Medidas de adaptación/mitigación ante islas de calor en el valle de Aburrá.

- Poon, C. S., Shui, Z. H., & Lam, L. (2004). Effect of microstructure of ITZ on compressive strength of concrete prepared with recycled aggregates. *Constr Build Mater.*
- Ram, K., Serdar, M., Londono-Zuluaga, D., & Scrivener, K. (2023). Does carbon footprint reduction impair mechanical properties and service life of concrete. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions.*
- Rodríguez, C., Miñano, I., Aguilar, M., Ortega, J., Parra, C., & Sánchez, I. (2017). Properties of concrete paving blocks and hollow tiles with recycled aggregate from construction and demolition wastes. doi:<https://doi.org/10.3390/ma10121374>
- Santiago, E. Q., Lima, P. R., Leite, M. B., & Toledo Filho, R. D. (2009). Mechanical behavior of recycled lightweight concrete using EVA waste and CDW under moderate temperature
Comportamento mecânico sob temperatura moderada de concreto leve reciclado produzido com resíduo de EVA e RCD.
- Sasanipour, H., & Aslani, F. (2020). Durability assessment of concrete containing surface pretreated coarse recycled concrete aggregates. *Constr Build Mater.*
- Sasanipour, H., & Aslani, F. (2020). Durability properties evaluation of self-compacting concrete prepared with waste fine and coarse recycled concrete aggregates. *Constr Build Mater.*
- Schuf, F. (septiembre de 2023). The global wildland–urban interface. *Nature.*
doi:10.1038/s41586-023-06320-0
- Silva, R. V., Brito, J., & Dhir, R. K. (2016). Performance of cementitious renderings and masonry mortars containing recycled aggregates from construction and demolition wastes. *Construction and Building Materials.*

UNE-EN 1338. (2004). Adoquines de Hormigón. Especificaciones y Métodos de Ensayo.

Vargas Samboni, P. (2016). Evaluación de la influencia de propiedades físicas y morfológicas de agregados livianos, en la microestructura de la Zona de Transición Interfacial (ITZ), en concretos. Obtenido de <http://www.bdigital.unal.edu.co/52480/>

Vargas, P., Restrepo-Baena, O., & Tobón, J. (2017). Microstructural analysis of interfacial transition zone (ITZ) and its impact on the compressive strength of lightweight concretes. *Construction and Building Materials*.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.101>

Wu, H., Zuo, J., Yuan, H., Zillante, G., & Wang, J. (2019). Resources , Conservation & Recycling A review of performance assessment methods for construction and demolition waste management. *Resour Conserv Recycl*.

Xie, N., Akin, M., & Shi, X. (2019). Permeable concrete pavements: A review of environmental benefits and durability. *Journal of Cleaner Production*, 210.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.134>

Yoshitake, I., Ueno, S., Ushio, T., Arano, H., & Fukumoto, S. (2016). Abrasion and skid resistance of recyclable fly ash concrete pavement made with limestone aggregate. *Construction and Building Materials*.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.185>

Yuan, H., & Shen, L. (2011). Trend of the research on construction and demolition waste management,” *Waste Management*. doi:10.1016

Zhang, C. (Enero de 2023). Life cycle assessment of material footprint in recycling: A case of concrete recycling. *Waste Management*.