DESDE 2013
https://repository.uaeh.edu.mx/revistas/index.php/icbi/issue/archive
Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI
ISSN: 2007-6363

Publicación Semestral Pädi Vol. 14 No. Especial 3 (2026) 370-384

Aprovechamiento integral de RCD en concretos sostenibles de baja resistencia
Comprehensive utilization of C&D waste in sustainable low-strength concrete

Iván F. Hernández-Peña[a], Iván E. Castañeda-Robles[b], Alex R. Sánchez-Huerta[c], Efraín Hernández-Hernández[a,*]

[a] *Licenciatura en Ingeniería Civil, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42184, Pachuca, Hidalgo, México.*
[b] *Área Académica de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42184, Pachuca, Hidalgo, México.*
[c] *Maestría en Ciencias de la Ingeniería Industrial, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42184, Pachuca, Hidalgo, México.*

Resumen

El incremento de los residuos de construcción y demolición (RCD) y la explotación intensiva de bancos de materiales han impulsado la búsqueda de alternativas sostenibles para la producción de concreto. En este estudio se evaluó la resistencia a compresión e impacto ambiental de concretos elaborados mediante la sustitución total de agregados naturales por RCD y la incorporación parcial y total de material cementante reciclado. Se diseñaron cuatro mezclas con una resistencia objetivo de f´c=150 kg/cm^2 y se determinó su resistencia a compresión a 7, 14 y 28 días. La mezcla elaborada con sustitución total de agregados naturales por RCD alcanzó 131.67 kg/cm^2 a los 28 días, mientras que la mezcla de referencia registró 118.23 kg/cm^2. Aunque ninguna de las formulaciones alcanzó la resistencia objetivo de 150 kg/cm^2, estos valores permiten comparar su comportamiento bajo las mismas condiciones experimentales. En contraste, la mezcla con sustitución del 50% del cemento Portland por material cementante reciclado presentó menor resistencia a la compresión, mientras que la mezcla con sustitución total del cemento Portland no desarrolló fraguado. Además, la sustitución total de agregados naturales por agregados reciclados provenientes de RCD redujo las emisiones de CO_2 e/m^3 en 4.51 %. Los resultados evidencian que los agregados reciclados representan una alternativa viable para concretos de baja resistencia y contribuyen al aprovechamiento sostenible de residuos bajo un enfoque de economía circular.

Palabras clave: Residuos de construcción y demolición (RCD), agregados reciclados, concreto sostenible, resistencia a la compresión, emisiones de CO_2.

Abstract

The increase in construction and demolition waste (CDW) and the intensive exploitation of aggregate extraction sites have driven the search for sustainable alternatives for concrete production. This study evaluated the compressive strength and environmental impact of concrete produced through the total replacement of natural aggregates with CDW and the partial and total incorporation of recycled cementitious material. Four mixtures were designed with a target compressive strength of f'c = 150 kg/cm^2, and their compressive strength was determined at 7, 14, and 28 days. The mixture produced with total replacement of natural aggregates by CDW reached 131.67 kg/cm^2 at 28 days, while the reference mixture recorded 118.23 kg/cm^2. Although none of the formulations reached the target compressive strength of 150 kg/cm^2, these values allow their behavior to be compared under the same experimental conditions. In contrast, the mixture with 50 % replacement of Portland cement by recycled cementitious material exhibited lower compressive strength, while the mixture with total replacement of Portland cement did not set. Additionally, the total replacement of natural aggregates with recycled aggregates obtained from CDW reduced CO_2 e emissions per cubic meter by 4.51 %. The results demonstrate that recycled aggregates represent a viable alternative for low-strength concrete and contribute to the sustainable use of waste within a circular economy approach.

Keywords: Construction and demolition waste (CDW), recycled aggregates, sustainable concrete, compressive strength, CO_2 emissions.

*Autor para la correspondencia: he384327@gmail.com
Correo electrónico: he472328@uaeh.edu.mx (Iván Felipe Hernández-Peña), he384327@uaeh.edu.mx (Efraín Hernández-Hernández), ivan_castaneda@uaeh.edu.mx (Iván E. Castañeda-Robles), sa540559@uaeh.edu.mx (Alex Rubén Sánchez-Huerta).

Historial del manuscrito: recibido el 28/05/2026, última versión-revisada recibida el 17/09/2026, aceptado el 02/10/2026, publicado el 06/11/2026. **DOI:** https://doi.org/10.29057/icbi.v14iEspecial3.17994

1. Introducción.

La industria de la construcción es uno de los sectores que mayor cantidad de residuos sólidos genera a nivel mundial, destacando los residuos de construcción y demolición (RCD), cuya generación incrementa debido al crecimiento urbano y la expansión de infraestructura. En México, únicamente alrededor del 4% de los RCD son aprovechados, de los cuales el 3% corresponde a reciclaje y el 1% a reúso, mientras que el resto es dispuesto en rellenos sanitarios o tiraderos clandestinos, generando impactos ambientales significativos (Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción, 2013). Asimismo, en la Ciudad de México se han recuperado más de 47 mil toneladas de RCD, lo que evidencia la magnitud de esta problemática y la necesidad de implementar estrategias orientadas a la sostenibilidad del sector (Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México, 2024).

Habert et al. (2020), Hussein et al. (2025) y Morales et al. (2024) coinciden en que la producción de concreto mantiene una alta dependencia de agregados naturales y cemento Portland, cuya extracción y fabricación contribuyen al agotamiento de recursos naturales, degradación de ecosistemas y emisiones de CO_2 asociadas a la industria de la construcción.

Por ello, la sustitución de agregados naturales por agregados reciclados obtenidos de RCD y la evaluación de material reciclado como reemplazo parcial o total del cemento Portland representan estrategias potenciales para reducir el impacto ambiental del concreto y fomentar una economía circular en el sector.

Diversas investigaciones han evaluado la incorporación de RCD como sustituto parcial de agregados naturales en concretos de baja resistencia, reportando comportamientos mecánicos favorables bajo porcentajes moderados de reemplazo. Litiano, M. et al. (2024) reportaron resistencias adecuadas con sustituciones de hasta 45%, mientras que Adame I. M. (2025) obtuvo resultados aceptables con reemplazos parciales del 20% en agregado grueso. De manera complementaria, Urrego, Y. et al. (2020) evaluaron residuos de mampostería como material cementante suplementario en concretos autocompactantes, obteniendo desempeños satisfactorios tanto en estado fresco como endurecido.

En el caso específico del polvo de concreto reciclado, se ha documentado que la hidratación del cemento presente en el concreto original puede ser incompleta, dejando partículas de clínker sin reaccionar que, después de la trituración, pueden quedar expuestas y participar en nuevas reacciones de hidratación (Prošek, Z. et al., 2020). Además, la finura del material puede favorecer el relleno de vacíos y la formación de sitios de nucleación (Zhu, P. et al., 2019). Su comportamiento como sustituto del cemento Portland también depende de la finura alcanzada y del porcentaje de reemplazo empleado (Li, S. et al., 2021). Con base en estos antecedentes, se consideró que el material podía conservar una actividad cementante residual y se incorporó en porcentajes de 50 y 100 % para evaluar su comportamiento como sustituto parcial y total del cemento Portland.

No obstante, la mayoría de estos estudios se limita a esquemas de sustitución parcial, existiendo poca evidencia experimental sobre concretos elaborados mediante sustitución total de agregados naturales y altos porcentajes de material cementante reciclado. En este sentido, la aportación científica del presente estudio consiste en proponer y evaluar un esquema de aprovechamiento integral de los RCD de concreto, en el que la arena y la grava recicladas sustituyen totalmente a los agregados naturales, mientras que la fracción del material fino recuperado durante el procesamiento se analiza como sustituto parcial y total del cemento Portland. A diferencia de investigaciones enfocadas únicamente en reemplazar uno de los componentes del concreto y en porcentajes moderados, este estudio compara cuatro formulaciones bajo una misma dosificación base, lo que permite analizar tanto la viabilidad como las limitaciones asociadas a niveles elevados de sustitución. Esto permite establecer qué componentes obtenidos de los RCD pueden reincorporarse en concretos de baja resistencia y reconocer las limitaciones de sustituir el cemento Portland con material previamente hidratado. Por ello, el presente estudio tiene como objetivo evaluar la resistencia a compresión y el impacto ambiental de un concreto simple diseñado para un f'c = 150 kg/cm², elaborado mediante la sustitución total de agregados naturales por residuos de construcción y demolición y la incorporación parcial y total de material cementante reciclado, con la finalidad de determinar su viabilidad para aplicaciones no estructurales de baja resistencia.

A partir de este planteamiento, el artículo describe la metodología seguida para la preparación y evaluación de las mezclas, y posteriormente presenta y discute los resultados de resistencia a compresión e impacto ambiental en función de las sustituciones realizadas. Finalmente, se exponen las conclusiones derivadas del estudio, sus limitaciones y las recomendaciones para continuar evaluando el aprovechamiento de RCD en la producción de concreto.

2. Metodología.

2.1. Enfoque y diseño de la investigación.

La investigación es de tipo experimental y explicativa, la cual presenta un enfoque mixto (cuantitativo y cualitativo), debido a que integra la medición, observación, registro y análisis de datos a través de pruebas y ensayos de laboratorio, lo cual permite evaluar variables individuales (granulometría, densidad, absorción e impacto ambiental relacionado a la extracción, procesamiento y producción de los materiales que conforman un concreto) y variables dependientes, en este caso, el comportamiento del concreto en estado fresco y endurecido.

El estudio tiene por objetivo analizar las variables y sus resultados por medio de métodos comparativos, los cuales contrastan los resultados obtenidos de las pruebas entre cada una de las muestras, con el fin de identificar relaciones entre las variables y analizar el comportamiento del concreto de acuerdo a su grado de sustitución y las características de sus componentes.

2.2. Población y muestra.

La población de estudio estuvo conformada por especímenes cilíndricos de concreto elaborados bajo distintas condiciones de sustitución de materiales. Para el desarrollo experimental se fabricaron 36 cilindros de concreto de 0.10 m de diámetro y 0.20 m de altura, manteniendo una relación altura-diámetro de 2:1, conforme a lo establecido por ASTM

International (2008). Cada tipo de mezcla estuvo representado por nueve especímenes identificados mediante su respectiva clave, como se indica en la Tabla 1. De los nueve cilindros correspondientes a cada mezcla, tres se ensayaron a los 7 días, tres a los 14 días y tres a los 28 días. Todos los especímenes se elaboraron bajo las mismas condiciones de dosificación, mezclado, moldeo y curado, con la finalidad de asegurar la uniformidad del procedimiento experimental y la comparabilidad de los resultados obtenidos.

Tabla 1: Clasificación y composición de las mezclas de concreto.

Clave	Descripción
M1-N	Concreto base elaborado con agregados naturales y cemento Portland Cruz Azul.
M2-R	Concreto elaborado mediante la sustitución total de los agregados naturales por agregados reciclados, con cemento Portland Cruz Azul.
M3-C-50	Concreto elaborado con sustitución total de agregados naturales por agregados reciclados y sustitución del 50 % del cemento Portland por material cementante reciclado.
M4-C-100	Concreto elaborado con sustitución total de agregados naturales por agregados reciclados y sustitución total del cemento Portland por material cementante reciclado.

2.3. Materiales y equipos.

Para la elaboración de las mezclas de concreto se emplearon residuos de concreto demolido, proveniente de cilindros de concreto utilizados en prácticas y ensayos realizados en el Laboratorio de Ingeniería Civil (Figura 1), así como fragmentos de concreto hidráulico triturados mecánicamente (Figura 2). También se utilizaron agregados naturales, específicamente arena y grava, como materiales de referencia para la mezcla base.

El cemento Portland Cruz Azul se empleó como material cementante principal en las mezclas M1-N y M2-R, mientras que en la mezcla M3-C-50 se utilizó en combinación con material cementante reciclado. Asimismo, se empleó agua potable para la elaboración de las mezclas de concreto, conforme a la norma ACI 318-19, Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural.



Figura 1: Cilindros de concreto postensayo utilizados como fuente de material reciclado.



Figura 2: Fragmentos de concreto hidráulico triturados mecánicamente para la obtención de agregados reciclados.

Para el desarrollo experimental se utilizaron diversos equipos y herramientas. La resistencia a la compresión de los cilindros se determinó mediante una prensa de compresión automática para concreto, marca CONTROLS Group, modelo WIZARD AUTO (serie 50-C13Wxx/50-A12Wxx), con capacidad de 2000 kN. Para la trituración, reducción de tamaño y acondicionamiento del material reciclado se utilizó una máquina de desgaste Los Ángeles. De igual manera, se empleó una báscula digital, modelo MKZ-BAS-ACS209, con capacidad de 40 kg; moldes cilíndricos de 10 × 20 cm; un cono de Abrams y herramientas de albañilería, para la preparación y manipulación de los materiales.

2.4. Fase experimental.

La fase experimental comprende las actividades relacionadas con la recolección, preparación y caracterización de los materiales empleados, así como el desarrollo de los procedimientos necesarios para la elaboración de las mezclas de concreto.

2.4.1. Recolección y preparación de materiales.

Los residuos de construcción y demolición (RCD) empleados en la presente investigación se obtuvieron a partir de cilindros de concreto y fragmentos de concreto hidráulico. Estos materiales fueron reducidos de tamaño inicialmente mediante herramientas manuales y posteriormente procesados en la máquina de desgaste Los Ángeles. Una vez procesado, el material fue clasificado mediante tamizado, lo que permitió separar sus diferentes fracciones según su tamaño de partícula en agregado fino (material que pasa por la malla No. 4), grueso (material retenido en la malla No. 4 y con un tamaño máximo de ¾") y material cementante (material que pasa la malla No. 200), de acuerdo con los criterios de clasificación establecidos en la norma ASTM C33, que define los tamaños, gradación y calidad de los agregados para concreto (ASTM International, 2018).

El material reciclado corresponde a la fracción fina recuperada durante el procesamiento y tamizado del concreto previamente endurecido. Debido a su origen, esta fracción puede estar constituida por partículas de la pasta cementicia y por finos generados a partir de los demás componentes del concreto durante su trituración; sin embargo, en la presente investigación no se determinó la proporción individual de estos componentes.

2.4.2. Caracterización de los materiales.

La caracterización de los materiales se realizó con el propósito de determinar sus propiedades físicas y evaluar su comportamiento potencial en mezclas de concreto. Los ensayos se aplicaron tanto a los agregados naturales como a los agregados reciclados (RCD), con la intención de comparar sus características y considerar su incorporación en las mezclas de acuerdo a los resultados. Para su desarrollo, se tomó como referencia el método de ensayo normalizado para determinar el análisis granulométrico de los áridos finos y gruesos (ASTM C 136-01).

2.4.2.1. Granulometría.

El análisis granulométrico se llevó a cabo conforme a la norma ASTM C136/C136M, que establece el método para la determinación de la gradación de los agregados mediante tamizado (ASTM International, 2019), con el objetivo de determinar la distribución de tamaños de partícula de los agregados. Previamente se llevó a cabo la práctica estándar para el muestreo de agregados, de acuerdo a la norma ASTM D75 (ASTM International, 2019). A partir de este proceso, se obtuvieron cuatro muestras representativas: agregado fino natural, agregado grueso natural, agregado fino reciclado y agregado grueso reciclado. Para cada una de ellas se empleó una cantidad de 3 kg.

Para el análisis del agregado grueso se utilizaron las siguientes mallas: 3/4", 1/2", 5/16", 1/4" y No. 4. El tamaño máximo nominal (TMN) del agregado utilizado en las probetas fue de 1/2" (12.5 mm). Por su parte, para el agregado fino se emplearon las mallas No. 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 30, 40, 60, 80, 100 y 200, permitiendo una clasificación más detallada del material en función de su tamaño de partícula. El material colocado en la parte superior del juego de tamices fue sometido a agitación manual y posteriormente, se determinó el peso del material retenido en cada una de las mallas con ayuda de la báscula digital, registrando los datos obtenidos.

A partir de los valores obtenidos, es posible calcular la masa retenida acumulada en cada tamiz con la ecuación (1), posteriormente se calculó el porcentaje retenido acumulado en cada tamiz, de acuerdo a los resultados obtenidos con la ecuación anterior, utilizando la ecuación (2), a continuación, se calculó el porcentaje que pasa en cada malla en base a la ecuación (3).

$$M_{ret\ acum.tamiz\ \#} = M_{ret.acum.tamiz\ sup.} + M_{ret.\ tamiz\ \#} \quad (1)$$

Donde:

M ret. acum. tamiz # = Material retenido acumulado en el tamiz # (g)

M ret. acum. tamiz sup. = Material retenido acumulado en el tamiz superior (g)

M ret. tamiz # = Material retenido en el tamiz # (g)

$$\%Ret_{\ acum.\ tamiz\ \#} = \frac{M_{ret.acum.tamiz\ \#}}{M} \times 100 \quad (2)$$

Donde:

%Ret acum. tamiz # = Porcentaje retenido acumulado en el tamiz # (%)

M ret. acum. tamiz #. = Material retenido acumulado en el tamiz # (g)

M = Masa de la muestra (g)

$$\%Pasa_{\ tamiz\ \#} = 100\% - \%Ret_{\ acum.\ tamiz\ \#} \quad (3)$$

Estas ecuaciones permiten identificar el tamaño máximo (TM), definido como el tamiz por el que pasa el 100% del agregado, y el tamaño máximo nominal (TMN), correspondiente al primer tamiz con un retenido superior al 5%. De igual manera hace posible el cálculo del módulo de finura (MF), definido como un índice numérico que representa el tamaño promedio de las partículas del agregado fino, y cuyo valor debe mantenerse entre 2.3 y 3.1 de acuerdo con ASTM International (2018), el MF se obtiene mediante la suma de los porcentajes retenidos acumulados en los tamices estándar ASTM (No. 4 a No. 100), como se muestra en la ecuación (4), la ecuación (5), se emplea para verificar la pérdida de material durante el ensayo mediante el porcentaje de diferencia de masas, el cual debe permanecer dentro del rango de 0.3% a 1% (ASTM International, 2019).

$$MF = \frac{\sum \%Ret_{\ acum.\ tamiz\ \#}}{100} \quad (4)$$

$$\%Dif.masas = \frac{M-(M_{ret.acum.ult.tamiz}+M_{fon.bandeja})}{M} \times 100 \quad (5)$$

Esta información es la base para elaborar la curva granulométrica correspondiente, la cual se realiza graficando el porcentaje (%) que pasa en cada tamiz sobre el eje Y en escala aritmética y en el eje X la abertura del tamiz (mm) en escala logarítmica, este ensayo hace posible evaluar la gradación del material y su adecuación para su uso en mezclas de concreto.

2.4.2.2. Densidad.

El procedimiento se llevó a cabo utilizando una probeta graduada para cada tipo de agregado. Para cada una de ellas, se empleó una cantidad de 200 g de material, posteriormente, se añadió 500 ml de agua. A partir de la variación del nivel del agua, se determinó el volumen del material como la diferencia entre el volumen final registrado y el volumen inicial del agua, para ello se utiliza la ecuación (6).

$$V = Vfinal - Vinicial \quad (6)$$

Donde:

V= Volumen del material (ml)

La determinación de la densidad de los agregados se realizó mediante el principio de Arquímedes, un método basado en el desplazamiento de volumen, con el objetivo de estimar la relación entre la masa y el volumen del material, utilizando la ecuación (7).

$$D = \frac{m}{V} \quad (7)$$

Donde:

D= Densidad (g/ml)

m= masa del material (g)

2.4.2.3. Absorción.

La absorción de los agregados se determina con el propósito de evaluar la cantidad de agua que el material es capaz de retener en sus poros, parámetro que influye directamente en el ajuste de la relación agua-cemento en las mezclas de concreto. Inicialmente las muestras son sumergidas en agua para saturar los poros, después se retiran los agregados y se seca la superficie hasta obtener la condición saturado superficialmente seco (SSS) para poder registrar su masa, a continuación, se seca la muestra en el horno a 110±5°C y se procede a registrar la masa de la muestra seca; con estos datos se calcula el porcentaje de absorción de acuerdo con la ecuación (8).

$$Absorción, \% = \frac{M_{humeda} - M_{seca}}{M_{seca}} \times 100 \qquad (8)$$

Este procedimiento se desarrolló tomando como referencia las normas ASTM C127/C127M y ASTM C128/C128M, que establecen los métodos para determinar la absorción de agua en agregados (ASTM International, 2015).

2.5. Diseño de la mezcla.

El diseño de la mezcla se desarrolló con el propósito de definir las proporciones adecuadas de los materiales que conforman el concreto, considerando las características físicas de los agregados y la incorporación de material cementante reciclado obtenido de RCD.

Para ello, se adoptó un método de dosificación volumétrica tomando como referencia la ficha técnica del Cemento Cruz Azul Tipo II CPC 30R RS para un concreto con un f'c = 150 kg/cm² (Cementos Cruz Azul, s. f.). Este procedimiento se seleccionó porque correspondía al objetivo de producir un concreto de baja resistencia para aplicaciones no estructurales, como firmes, banquetas, guarniciones, ciclovías y plantillas, y permitió mantener una dosificación base común en las mezclas evaluadas para comparar el efecto de las diferentes sustituciones por RCD. La dosificación seleccionada se verificó experimentalmente mediante las pruebas de revenimiento y resistencia a compresión, de manera congruente con el principio de mezclas de prueba descrito en ACI PRC-211.1-22 (American Concrete Institute, 2022).

2.5.1. Dosificación de materiales.

De acuerdo con la dosificación seleccionada, por cada bulto de cemento Portland de 50 kg se emplearon 5.5 cubetas de arena y 6.75 cubetas de grava, con una capacidad de 19 L cada una. Para la elaboración de 1 m³ de concreto, esta dosificación se aplicó seis veces, obteniéndose 300 kg de cemento, equivalentes a 0.30 toneladas; 0.627 m³ de arena y 0.7695 m³ de grava. Los valores correspondientes a los agregados representan volúmenes sueltos de dosificación medidos mediante cubetas de 19 Litros.

La cantidad total del componente cementante se mantuvo en 300 kg/m³ en las cuatro formulaciones. En las mezclas M1-N y M2-R se utilizaron 300 kg/m³ de cemento Portland; en M3-C-50 se emplearon 150 kg/m³ de cemento Portland y 150 kg/m³ de fracción fina reciclada; mientras que en M4-C-100 los 300 kg/m³ correspondieron a la fracción fina reciclada. En cuanto a los agregados, M1-N se elaboró con arena y grava naturales, mientras que en M2-R, M3-C-50 y M4-C-100 estos materiales fueron sustituidos totalmente por arena y grava recicladas, conservando los volúmenes de dosificación establecidos.

Para expresar de manera uniforme el contenido de agua, se consideró la relación entre el agua efectiva y la masa total del componente cementante, integrada por el cemento Portland y, cuando correspondió, por la fracción fina reciclada. Esta relación se expresa como agua/cementante total (a/mc), debido a que las formulaciones M3-C-50 y M4-C-100 no contienen únicamente cemento Portland. La relación efectiva de diseño se mantuvo en 0.50, equivalente a 150 L de agua efectiva por cada 300 kg de material cementante.

Debido a las diferencias de absorción y demanda de agua de los agregados, el ajuste se realizó considerando su condición de saturado superficialmente seco (SSS), con el propósito de diferenciar el agua retenida en sus poros del agua efectiva disponible en la mezcla. La cantidad total incorporada durante la elaboración fue de 186 L/m³ para M1-N y de 240 L/m³ para M2-R y M3-C-50, correspondientes a relaciones brutas a/mc de 0.62 y 0.80, respectivamente. Por tanto, respecto a los 150 L/m³ de agua efectiva de diseño, el ajuste aplicado fue de 36 L/m³ en M1-N y de 90 L/m³ en M2-R y M3-C-50. Para la conversión entre masa y volumen se consideró una densidad del agua de 1 kg/L. Lo anterior permitió conservar la consistencia requerida de las mezclas y mantener la relación efectiva a/c de diseño, con el propósito de minimizar posibles efectos adversos sobre el desarrollo de la resistencia a la compresión del concreto.

2.6. Prueba de revenimiento.

La trabajabilidad y consistencia del concreto en estado fresco se evaluó mediante la prueba de revenimiento utilizando el cono de Abrams.

Este procedimiento se desarrolló tomando como referencia la norma ASTM C143/C143M, que establece el método para la determinación del revenimiento del concreto hidráulico (ASTM International, 2019).

2.7. Curado de especímenes.

Una vez fabricados los cilindros de concreto permanecieron en reposo dentro del laboratorio, para evitar alteraciones durante el proceso inicial de fraguado.

Los especímenes fueron desmoldados a las 24 horas, para posteriormente ser sometidos a un proceso de curado mediante inmersión en agua, permaneciendo completamente sumergidos durante periodos de 7, 14 y 28 días, con el fin de favorecer el desarrollo de la resistencia a compresión correspondiente a cada edad de ensayo.

2.8. Ensayo de resistencia a la compresión.

La resistencia a la compresión de los cilindros de concreto se determinó mediante el uso de una prensa de compresión automática, marca CONTROLS Group, modelo WIZARD AUTO, tomando como referencia la norma ASTM C39/C39M, que establece el método para la determinación de la resistencia

a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto (ASTM International, 2021).

Previo al ensayo se registraron las dimensiones (diámetro y altura) y el peso de cada cilindro, para el cálculo del área transversal y el registro correspondiente en la máquina de compresión.

El ensayo se realizó mediante la aplicación de una carga axial a una velocidad de 2.5 kg/cm²/s hasta provocar la falla del espécimen.

2.9. Análisis estadístico de los resultados.

Para el análisis estadístico de la resistencia a la compresión se consideraron tres especímenes por cada mezcla y edad de ensayo (n = 3), de acuerdo con la distribución descrita en el apartado 2.2. Los resultados individuales de los tres cilindros correspondientes a cada grupo se analizaron de manera independiente, sin combinar mezclas ni edades de ensayo. A partir de estos valores se obtuvo la resistencia promedio y se calculó la desviación estándar muestral mediante la ecuación (9):

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (9)$$

Donde:

s= desviación estándar muestral de la resistencia a la compresión (kg/cm²)

x_i= resistencia obtenida en cada espécimen (kg/cm²)

$\bar{x}$= resistencia promedio de los tres especímenes correspondientes a una misma mezcla y edad de ensayo (kg/cm²)

n= número de cilindros evaluados en cada grupo, n=3

La desviación estándar se calculó utilizando (n-1) grados de libertad debido a que los tres especímenes representan una muestra del comportamiento de cada dosificación. Los resultados se expresaron como promedio ± desviación estándar, con el propósito de evaluar la dispersión entre los especímenes y la consistencia de las diferencias observadas entre las mezclas. M4-C-100 no se incluyó en este análisis debido a que no desarrolló fraguado y no fue posible determinar su resistencia a la compresión.

2.10. Evaluación de impacto ambiental.

El impacto ambiental de las mezclas M1-N, M2-R y M3-C-50 se determinó mediante un análisis de ciclo de vida (LCA) desarrollado en el software One Click LCA. Como indicador se utilizó el potencial de calentamiento global de origen fósil, el cual cuantifica el efecto de las emisiones de gases de efecto invernadero de origen fósil y se expresa en kg de CO_2 equivalente. El análisis permitió comparar las emisiones asociadas con cada mezcla y determinar el efecto de la sustitución total de agregados naturales por agregados reciclados provenientes de RCD, así como de la sustitución parcial del cemento Portland por material cementante reciclado.

Para la modelación se estableció una unidad de referencia de 1 m³ de concreto. El inventario de materiales se integró con las cantidades correspondientes a la dosificación empleada en la elaboración de cada mezcla. Para M1-N se consideraron 0.300 t de cemento Portland, 1.003 t de agregado fino natural, 1.154 t de agregado grueso natural y 0.186 t de agua. En M2-R se registraron 0.300 t de cemento Portland, 1.003 t de agregado fino reciclado, 1.154 t de agregado grueso reciclado y 0.240 t de agua. Para M3-C-50 se utilizaron 0.150 t de cemento Portland, 0.150 t de material cementante reciclado, 1.003 t de agregado fino reciclado, 1.154 t de agregado grueso reciclado y 0.240 t de agua. En consecuencia, los resultados se expresaron en kg CO_2 e/m³ de concreto.

Los materiales incorporados en el inventario se vincularon con declaraciones ambientales de producto o con conjuntos de datos disponibles en One Click LCA. El impacto de cada componente se obtuvo a partir de la cantidad modelada y su factor de emisión, y posteriormente se sumaron las contribuciones correspondientes a los módulos del ciclo de vida considerados. Debido a que no se dispuso de una declaración ambiental de producto específica para la fracción fina de concreto reciclado utilizada como material cementante, las 0.150 t incorporadas en M3-C-50 se representaron mediante un conjunto de datos correspondiente a materiales reciclados provenientes de RCD. Por tanto, este conjunto de datos se utilizó como una aproximación para la modelación del material cementante reciclado.

La comparación principal comprendió los módulos A1-A3, correspondientes al suministro y procesamiento de materias primas y a la fabricación de los materiales; A4, asociado con el transporte de los materiales hasta el sitio de utilización; y A5, relacionado con el proceso de elaboración del concreto y el consumo de agua. No se incluyeron las actividades de mantenimiento, reparación, sustitución y rehabilitación, ni los consumos operacionales de energía y agua durante la etapa de uso, correspondientes a los módulos B2-B7.

Tampoco se consideraron las etapas de demolición, transporte de los residuos, procesamiento para su recuperación y disposición final, correspondientes a los módulos C1-C4, ni los beneficios potenciales derivados de la reutilización, recuperación o reciclaje de los materiales fuera de los límites del sistema, representados por el módulo D. Por lo anterior, el alcance del estudio corresponde a un análisis parcial del ciclo de vida, ya que no comprende la totalidad de las etapas de uso y fin de vida del concreto.

De manera complementaria, se evaluó el módulo B1, correspondiente a la captura estimada de CO_2 por carbonatación del concreto durante su etapa de uso. Para mantener una comparación uniforme basada en los módulos A1-A5, la contribución de B1 se analizó por separado como un escenario de sensibilidad.

La mezcla M4-C-100 no se incluyó en el análisis ambiental debido a que no desarrolló fraguado y, por tanto, no fue posible considerarla como un concreto funcional comparable con las demás mezclas evaluadas.

3. Resultados.

3.1. Resistencia a la compresión.

Los resultados obtenidos se presentan en la Figura 3, donde se muestra la evolución de la resistencia promedio a la compresión de las distintas mezclas en las edades evaluadas. Cada valor corresponde al promedio de tres especímenes.

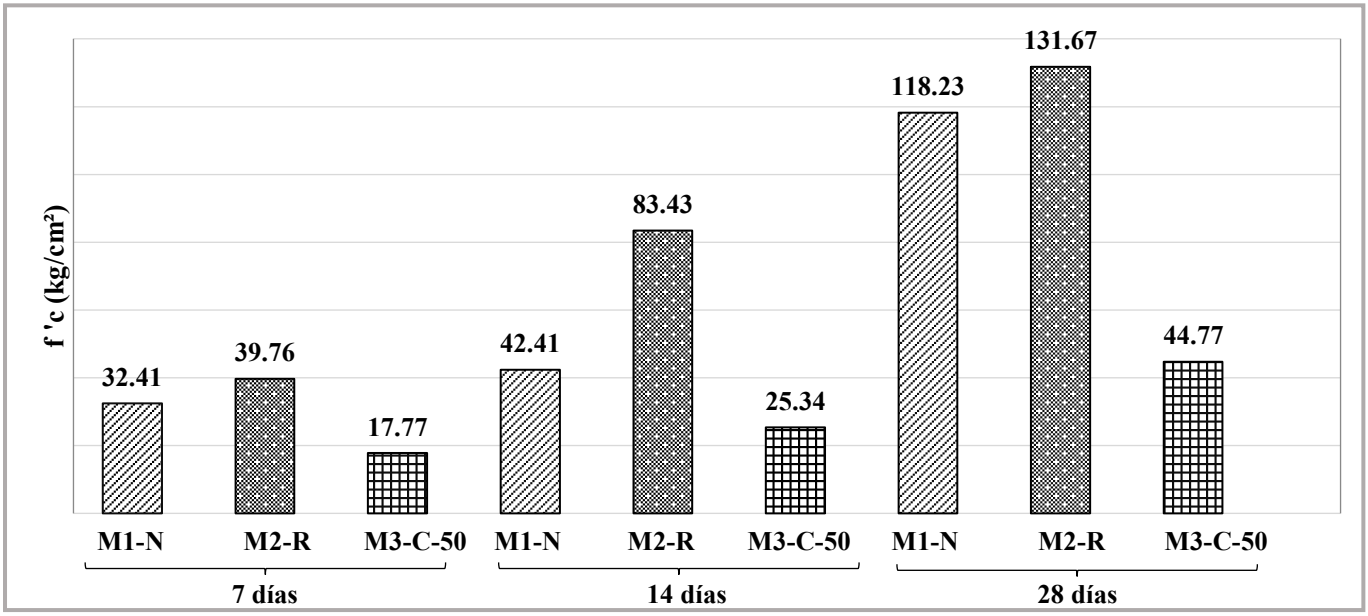


Figura 3: Evolución de la resistencia promedio a la compresión de las mezclas de concreto a diferentes edades de curado.

El concreto de referencia (M1-N) desarrolló resistencias promedio de 32.41 kg/cm² a los 7 días, 42.41 kg/cm² a los 14 días y 118.23 kg/cm² a los 28 días, observándose un incremento progresivo de la resistencia con el aumento de la edad de ensayo.

La mezcla M2-R, correspondiente a la sustitución total de agregados naturales por residuos de construcción y demolición (RCD), alcanzó resistencias promedio de 39.76, 83.43 y 131.67 kg/cm² a los 7, 14 y 28 días, respectivamente, presentando valores superiores a la mezcla M1-N en todas las edades evaluadas.

Por otro lado, la mezcla M3-C-50 presentó resistencias promedio de 17.77 kg/cm² a los 7 días, 25.34 kg/cm² a los 14 días y 44.77 kg/cm² a los 28 días, evidenciando una disminución considerable de la resistencia a compresión respecto a las mezclas M1-N y M2-R.

Los valores promedio y sus correspondientes desviaciones estándar muestrales para cada mezcla y edad de ensayo se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2: Resistencia promedio y desviación estándar muestral de tres especímenes por mezcla y edad de ensayo (kg/cm²).

Mezcla	7 días	14 días	28 días
M1-N	32.41 ± 1.31	42.41 ± 3.22	118.23 ± 2.66
M2-R	39.76 ± 0.79	83.43 ± 2.74	131.67 ± 5.60
M3-C-50	17.77 ± 0.85	25.34 ± 1.73	44.77 ± 1.94

A los 7, 14 y 28 días, las menores diferencias registradas entre las resistencias promedio de las mezclas fueron de 7.35, 17.07 y 13.44 kg/cm², respectivamente, mientras que las mayores desviaciones estándar obtenidas en esas edades fueron de 1.31, 3.22 y 5.60 kg/cm².

Debido a que las diferencias entre los promedios fueron mayores que la dispersión observada entre los tres especímenes de cada grupo, los resultados muestran consistencia entre las réplicas, indican que las diferencias registradas no se explican por una dispersión elevada y permiten realizar una comparación descriptiva entre las formulaciones evaluadas.

En el caso de la mezcla M4-C-100, no se observó fraguado bajo las condiciones evaluadas, lo que impidió determinar la resistencia a compresión, ver Figura 4.



Figura 4: Ausencia de fraguado en la mezcla M4-C-100.

3.1.1. Comportamiento de fractura de las mezclas.

En la mezcla de referencia M1-N se observó un patrón de fractura predominantemente longitudinal, caracterizado por fisuras verticales distribuidas a lo largo del espécimen, manteniendo una geometría relativamente íntegra y sin desprendimientos importantes de material, ver Figura 5.



Figura 5: Patrón de fractura observado en la mezcla M1-N.

En la mezcla M2-R se observó un patrón de fractura con fisuras longitudinales distribuidas sobre la superficie del espécimen, acompañado de desprendimientos localizados y pérdida parcial de material en algunas zonas laterales, ver Figura 6.



Figura 6: Patrón de fractura observado en la mezcla M2-R.

La mezcla M3-C-50 presentó un patrón de fractura más irregular, caracterizado por agrietamiento longitudinal pronunciado, desprendimiento considerable de material y deterioro lateral del espécimen, observándose una pérdida importante de integridad en la superficie, ver Figura 7.

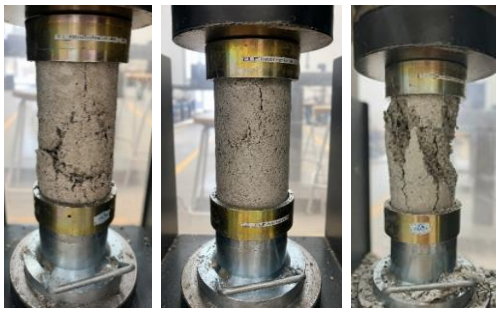


Figura 7: Patrón de fractura observado en la mezcla M3-C-50.

3.2. Propiedades físicas de los materiales.

Las propiedades físicas de los agregados utilizados se presentan en la Tabla 3. En general, los agregados reciclados (RCD) muestran menores densidades y mayores porcentajes de absorción en comparación con los agregados naturales.

Tabla 3: Propiedades físicas de los materiales

Tipo de agregado	Densidad (g/ml)	Absorción (%)
Fino natural	2.062	25.29
Fino RCD	1.905	31.06
Grueso natural	2.105	6.08
Grueso RCD	1.818	9.59

En los agregados finos reciclados se registró una densidad de 1.905 g/ml y una absorción de 31.06 %, mientras que el agregado fino natural presentó valores de 2.062 g/ml y 25.29 %, respectivamente. De manera similar, el agregado grueso reciclado presentó una menor densidad y mayor absorción respecto al agregado grueso natural.

La distribución granulométrica de los agregados naturales y reciclados se presenta en la Figura 8, donde se observan diferencias en la gradación entre ambos materiales, particularmente en el rango de tamaños finos.

3.3. Impacto ambiental de las mezclas de concreto.

Los resultados del análisis ambiental obtenidos mediante One Click LCA se presentan en la Tabla 4. La comparación principal consideró los módulos A1-A3, A4 y A5, aplicados bajo los mismos límites del sistema para las mezclas M1-N, M2-R y M3-C-50.

Tabla 4: Potencial de calentamiento global de las mezclas evaluadas en los módulos A1-A5.

Mezcla	A1-A3 (kg de CO_2 e/m^3)	A4 (kg de CO_2 e/m^3)	A5 (kg de CO_2 e/m^3)	Total, A1-A5 (kg de CO_2 e/m^3)	Reducción respecto a M1-N
M1-N	210.67	7.57	10.28	228.52	-
M2-R	203.73	4.19	10.30	218.22	4.51%
M3-C-50	102.27	4.00	5.12	111.39	51.26%

La mezcla de referencia M1-N presentó un impacto total de 228.52 kg CO_2 e/m³. La mezcla M2-R registró 218.22 kg CO_2 e/m³, lo que representa una reducción de 10.30 kg CO_2 e/m³, equivalente a 4.51 %. Esta disminución se distribuyó en 6.94 kg CO_2 e/m³ en los módulos A1-A3 y 3.38 kg CO_2 e/m³ en A4, mientras que A5 presentó un incremento de 0.02 kg CO_2 e/m³. Debido a que M1-N y M2-R conservaron el mismo contenido de cemento Portland, la reducción se relacionó principalmente con la sustitución total de los agregados naturales por agregados reciclados provenientes de RCD y con las condiciones de transporte consideradas en la modelación.

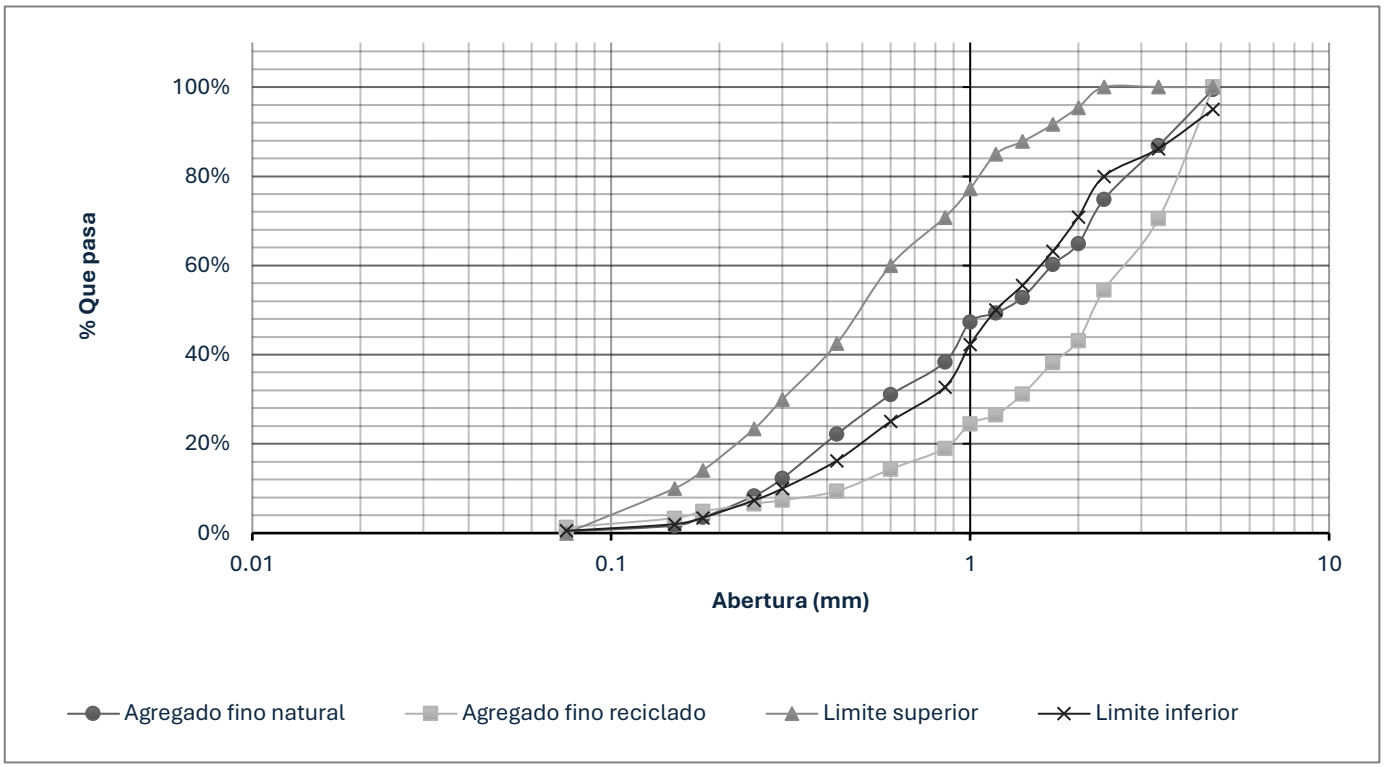
M3-C-50 presentó el menor impacto en la comparación principal, con 111.39 kg CO_2 e/m³, correspondiente a una reducción de 117.13 kg CO_2 e/m³, equivalente a 51.26 % respecto a M1-N. La disminución fue de 108.40 kg CO_2 e/m³ en A1-A3, 3.57 kg CO_2 e/m³ en A4 y 5.16 kg CO_2 e/m³ en A5. El cambio más importante se observó en A1-A3 y estuvo asociado principalmente con la reducción del cemento Portland de 0.300 a 0.150 t/m³, además de la incorporación de agregados y material cementante reciclados. Por tanto, la reducción obtenida en M3-C-50 no puede atribuirse exclusivamente al aprovechamiento de RCD, debido a que también intervino la disminución del contenido de cemento Portland.

Con el propósito de evaluar la influencia de la carbonatación sobre los resultados, se desarrolló un análisis de sensibilidad mediante la incorporación del módulo B1. Los resultados se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5: Influencia del módulo B1 en el potencial de calentamiento global de las mezclas

Mezcla	A1-A5 (kg de CO_2 e/m^3)	B1 (kg de CO_2 e/m^3)	Total con B1 (kg de CO_2 e/m^3)	Reducción respecto a M1-N
M1-N	228.52	0	228.52	-
M2-R	218.22	-20.76	197.46	13.59%
M3-C-50	111.39	-28.06	83.33	63.54%

a)



b)

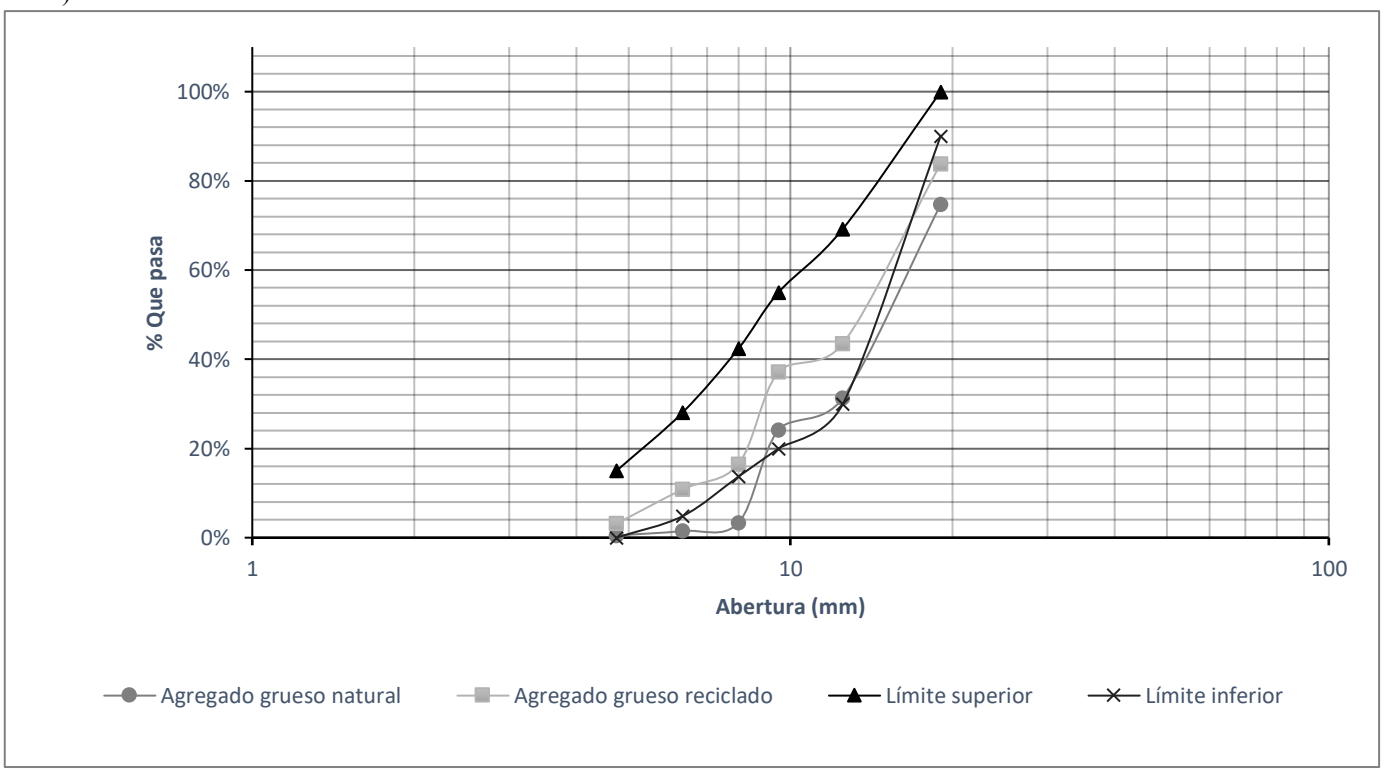


Figura 8. Distribución granulométrica de los a) agregados finos y b) agregados grueso representada en escala logarítmica.

Los valores negativos de B1 representan la captura estimada de CO_2 por carbonatación del concreto durante su etapa de uso. Al incorporar este módulo, el impacto de M2-R disminuyó de 218.22 a 197.46 kg CO_2 e/m³ y su reducción respecto a M1-N aumentó de 4.51 a 13.59 %. En M3-C-50, el impacto disminuyó de 111.39 a 83.33 kg CO_2 e/m³ y la reducción aumentó de 51.26 a 63.54 %. Aunque la incorporación de B1 no modificó el orden ambiental de las mezclas, incrementó el beneficio atribuido a M2-R y M3-C-50. Por tanto, los resultados de B1 se interpretaron únicamente como un análisis de sensibilidad y no como parte de la comparación ambiental principal.

4. Discusión.

4.1. Influencia de los agregados reciclados en la resistencia y fractura del concreto.

Los resultados obtenidos muestran que la sustitución total de agregados naturales por residuos de construcción y demolición (M2-R) fue viable en términos de resistencia a compresión bajo las condiciones evaluadas, ya que la mezcla alcanzó resistencias superiores al concreto M1-N en todas las edades de ensayo, con un valor de 131.67 kg/cm² a los 28 días. Este comportamiento sugiere que las características del agregado reciclado favorecieron el desarrollo resistente de la mezcla, particularmente debido a su textura superficial y morfología irregular, las cuales pueden mejorar la interacción entre el agregado y la pasta cementante. Adicionalmente, aunque las curvas granulométricas de los agregados reciclados presentaron variaciones respecto a los límites establecidos por ASTM C33, especialmente en el agregado fino reciclado, la resistencia a compresión de la mezcla M2-R no se vio afectada negativamente bajo las condiciones evaluadas. Esto indica que las propiedades físicas propias del material reciclado, tales como su menor densidad y mayor absorción que los naturales, así como la presencia de mortero adherido, pudieron contribuir a compensar parcialmente los efectos asociados a una gradación menos uniforme.

Este comportamiento difiere de lo reportado por Silva, R. et al. (2014), Evangelista, L. et al. (2007) y Zhang, P. et al. (2023), quienes señalan que el uso de agregados reciclados suele asociarse con reducciones en la resistencia mecánica debido a la mayor porosidad del material reciclado y a la presencia de mortero adherido. Asimismo, Poon, C. S. et al. (2004) indican que la zona de transición interfacial en concretos con agregados reciclados presenta una microestructura más porosa, lo que puede afectar negativamente el desempeño mecánico del concreto. Sin embargo, en el presente estudio, las propiedades físicas del material reciclado empleado parecen haber compensado los efectos negativos asociados a su porosidad, al menos dentro de las condiciones de sustitución total evaluadas.

Los patrones de fractura observados también respaldan esta tendencia, ya que la mezcla M2-R presentó fisuras longitudinales y desprendimientos localizados, pero conservó una integridad superficial relativamente similar a la mezcla de referencia. Esto indica que la sustitución de agregados naturales por RCD no alteró de manera significativa el mecanismo general de falla del concreto.

4.2. Influencia del material cementante reciclado en la resistencia a compresión del concreto.

A diferencia de lo observado con los agregados reciclados, la incorporación de material cementante reciclado tuvo un efecto adverso sobre la resistencia a la compresión. La mezcla M3-C-50 presentó resistencias considerablemente menores respecto a M1-N y M2-R, alcanzando 44.77 kg/cm² a los 28 días, además de mostrar un patrón de fractura más irregular, con mayor desprendimiento de material y pérdida de integridad superficial.

Una causa adicional de esta disminución fue la reducción del contenido de cemento Portland, debido a que la sustitución del 50 % disminuyó la cantidad de material hidráulicamente reactivo disponible en la mezcla. Bajo las condiciones evaluadas, la fracción fina reciclada no presentó una reactividad equivalente que permitiera compensar dicha reducción.

Este comportamiento puede relacionarse principalmente con la naturaleza del material utilizado como sustituto. La fracción reciclada procede del procesamiento de concreto previamente endurecido y, por lo tanto, parte del material cementico ya había participado en un proceso de hidratación. Este comportamiento coincide con lo reportado por Rocha, J. A. et al. (2023), quienes señalan que el polvo de concreto reciclado presenta una reactividad limitada debido a la presencia de productos de hidratación previamente formados. De manera complementaria, Zhu, P. et al. (2019) indican que el comportamiento cementante de estos materiales depende de mecanismos como el efecto de microrelleno, la hidratación de partículas no reaccionadas y, en menor medida, de su actividad puzolánica, la cual se encuentra directamente influenciada por la finura y el procesamiento del material reciclado.

Asimismo, Kim, J. et al. (2024) reportan que el polvo de concreto reciclado requiere procesos de activación térmica para incrementar su reactividad y mejorar el desempeño mecánico de las mezclas cementicias. Sin embargo, también señalan que el incremento en el porcentaje de sustitución tiende a reducir progresivamente la resistencia mecánica y la durabilidad del material, particularmente bajo condiciones no optimizadas.

La mezcla M4-C-100 representó el caso más crítico, la ausencia de fraguado confirmó que el material cementante reciclado no presentó las propiedades necesarias para sustituir totalmente al cemento Portland bajo las condiciones del estudio. Este resultado era consistente con la reactividad limitada esperada para un material cuyo componente cementicio había reaccionado previamente durante la hidratación del concreto de origen y que no fue sometido a procesos de activación para recuperar o incrementar su capacidad reactiva. Este resultado evidencia que, aunque el uso de polvo reciclado puede representar una alternativa complementaria en sustituciones parciales, su aplicación como reemplazo total del cemento convencional continúa presentando importantes limitaciones técnicas.

4.3. Implicaciones ambientales y viabilidad técnica.

Desde el punto de vista ambiental, y considerando los módulos A1-A5 bajo los mismos límites del sistema, la mezcla convencional M1-N presentó el mayor impacto, con 228.52 kg CO_2 e/m³, mientras que M2-R registró 218.22 kg CO_2 e/m³. La diferencia de 10.30 kg CO_2 e/m³ representa una reducción de 4.51 % respecto a la mezcla de referencia. En el desglose por etapas, el impacto de los módulos A1-A3 disminuyó de 210.67 a 203.73 kg CO_2 e/m³ y el correspondiente al módulo A4 se redujo de 7.57 a 4.19 kg CO_2 e/m³. En contraste, la contribución del módulo A5 se mantuvo prácticamente constante, con valores de 10.28 y 10.30 kg CO_2 e/m³ para M1-N y M2-R, respectivamente. Debido a que ambas mezclas conservaron un contenido de 0.300 t/m³ de cemento Portland, la reducción obtenida por M2-R se relaciona con la sustitución total de los agregados naturales por agregados reciclados

provenientes de RCD y con la menor contribución del transporte considerada en la modelación.

Esta reducción resulta relevante debido a que M2-R alcanzó una resistencia a la compresión de 131.67 kg/cm² a los 28 días, superior a los 118.23 kg/cm² obtenidos por M1-N. Por tanto, M2-R presentó el mejor balance entre resistencia a la compresión e impacto ambiental entre las mezclas evaluadas, ya que la incorporación de agregados reciclados redujo las emisiones de CO_2 e/m³ sin disminuir el desempeño mecánico respecto a la mezcla de referencia.

Por otra parte, M3-C-50 presentó el menor impacto ambiental en la comparación principal, con 111.39 kg CO_2 e/m³, equivalente a una reducción de 51.26 % respecto a M1-N. En esta mezcla, la contribución de los módulos A1-A3 disminuyó a 102.27 kg CO_2 e/m³, mientras que los módulos A4 y A5 registraron 4.00 y 5.12 kg CO_2 e/m³, respectivamente. La reducción se relacionó principalmente con la disminución del contenido de cemento Portland de 0.300 a 0.150 t/m³, además de la incorporación de agregados reciclados y de 0.150 t/m³ de material cementante reciclado. Sin embargo, esta ventaja ambiental estuvo acompañada de una disminución significativa de la resistencia a la compresión, debido a que M3-C-50 solamente alcanzó 44.77 kg/cm² a los 28 días. En consecuencia, su menor impacto ambiental por metro cúbico no implica una mayor viabilidad técnica bajo las condiciones estudiadas.

Los módulos A1-A3 concentraron entre 91.81 y 93.36 % del impacto total correspondiente a A1-A5, lo que evidencia que el suministro, procesamiento y fabricación de los materiales constituyeron la principal fuente de impacto ambiental de las mezclas evaluadas. Este comportamiento se relaciona principalmente con la contribución del cemento Portland y coincide con lo reportado por Watari, T. et al. (2023) y Wang, Q. et al. (2024), quienes señalan que la producción y el transporte de agregados, así como la fabricación de cemento Portland, constituyen una parte significativa del impacto ambiental asociado con el concreto. Asimismo, Hussein, H. et al. (2025) destacan que la extracción intensiva de agregados naturales genera efectos negativos sobre los ecosistemas y contribuye al deterioro ambiental derivado de la explotación de recursos pétreos.

En el análisis de sensibilidad, la incorporación del módulo B1 redujo el impacto de M2-R a 197.46 kg CO_2 e/m³ y el de M3-C-50 a 83.33 kg CO_2 e/m³. Estos resultados representan disminuciones de 13.59 y 63.54 %, respectivamente, en comparación con M1-N. La inclusión de la captura estimada de CO_2 por carbonatación no modificó el orden ambiental de las mezclas, debido a que M3-C-50 continuó presentando el menor impacto, seguida de M2-R y M1-N. Dado que la comparación ambiental principal se estableció con los módulos A1-A5, los resultados obtenidos al incorporar B1 se presentaron por separado con el propósito de examinar la



Figura 9: Ciclo de aprovechamiento y reincorporación de RCD en la producción de concretos sostenibles.

influencia potencial de la carbonatación sobre el impacto ambiental de las mezclas.

En conjunto, los resultados indican que la sustitución total de agregados naturales por agregados reciclados provenientes de RCD puede reducir el impacto ambiental del concreto sin comprometer su resistencia a la compresión respecto a la mezcla convencional. En contraste, la sustitución parcial del cemento Portland por material cementante reciclado produjo una reducción ambiental considerable, pero estuvo acompañada de una disminución importante de la resistencia a la compresión. La sustitución total del cemento Portland quedó descartada desde el punto de vista técnico, debido a que M4-C-100 no desarrolló fraguado.

En términos de aplicación, los resultados identifican a M2-R como la alternativa con RCD de mayor viabilidad técnica y ambiental entre las formulaciones evaluadas, debido a que mantuvo el uso de cemento Portland, presentó el mejor desempeño a compresión y redujo las emisiones de CO_2 e/m³. Considerando el nivel de resistencia alcanzado y el alcance experimental del estudio, su utilización podría orientarse potencialmente a elementos de concreto de baja resistencia y aplicaciones no estructurales, como firmes, banquetas, guarniciones, ciclovías o plantillas. No obstante, su implementación en cada aplicación específica deberá condicionarse al cumplimiento de los requisitos mecánicos, de durabilidad y normativos correspondientes. En contraste, la resistencia alcanzada por M3-C-50 limita su aplicación directa bajo las condiciones estudiadas.

4.4. Enfoque de economía circular aplicado al aprovechamiento de RCD.

El aprovechamiento de los RCD evaluados en esta investigación se plantea bajo un enfoque de economía circular, entendiendo como la reincorporación de materiales residuales al ciclo productivo con el propósito de prolongar su aprovechamiento y disminuir la demanda de materias primas convencionales. A diferencia de un esquema lineal, basado en la extracción de recursos, producción, utilización y disposición final, el proceso propuesto considera la recuperación, trituración y clasificación de residuos de concreto para obtener fracciones susceptibles de ser evaluadas en nuevas mezclas.

El proceso de aprovechamiento propuesto no implica la separación de cemento Portland puro a partir del concreto endurecido. Durante el procesamiento de los RCD, la trituración y el acondicionamiento mecánico favorecen la reducción de tamaño y el desprendimiento parcial de la pasta y el mortero adheridos a los agregados. Posteriormente, el tamizado permite realizar una separación granulométrica del material en agregado grueso reciclado, agregado fino reciclado y una fracción fina que pasa la malla No. 200. Esta última corresponde a un material heterogéneo derivado del concreto procesado y fue evaluada en esta investigación como sustituto parcial y total del cemento Portland.

Como se expuso en la Introducción, la posible contribución de la fracción fina recuperada puede relacionarse con partículas de clínker que no reaccionaron completamente en el concreto original y que quedan expuestas después de la trituración, así como con efectos físicos de relleno de vacíos y formación de sitios de nucleación. Estos mecanismos no significan que la pasta previamente hidratada recupere las propiedades originales del cemento Portland ni permiten asumir que la fracción fina posee una capacidad hidráulica equivalente.

En la presente investigación no se realizó una caracterización química o mineralógica ni se aplicaron procesos de activación, por lo que no se demostró previamente que la fracción fina pudiera sustituir completamente al cemento Portland. Las sustituciones del 50 y 100 % se evaluaron para identificar los límites de aprovechamiento del material, considerando la sustitución total como una condición extrema. La mezcla con 50 % de sustitución desarrolló resistencia debido a la presencia simultánea de cemento Portland y fracción fina recuperada, aunque con un desempeño reducido, mientras que la sustitución total no desarrolló fraguado. En consecuencia, bajo las condiciones evaluadas, la fracción fina recuperada no demostró capacidad para sustituir completamente al cemento Portland.

Por tanto, el esquema circular propuesto debe entenderse como una estrategia de valorización condicionada por el desempeño técnico de cada fracción recuperada y no como una reincorporación ilimitada del residuo. En particular, el aprovechamiento de la fracción fina como sustituto del cemento Portland requiere investigaciones posteriores que incluyan su caracterización química y mineralógica, así como la evaluación de procesos de activación que permitan determinar y, en su caso, incrementar su reactividad.

La evaluación ambiental complementa este enfoque mediante el análisis de ciclo de vida de las mezclas M1-N, M2-R y M3-C-50. Para una unidad de referencia de 1 m³ y considerando los módulos A1-A5, la mezcla convencional presentó un impacto de 228.52 kg CO_2 e/m³, mientras que M2-R y M3-C-50 registraron 218.22 y 111.39 kg CO_2 e/m³, respectivamente. Estos valores representan reducciones de 4.51 y 51.26 % respecto a la mezcla convencional. Sin embargo, los resultados ambientales deben interpretarse conjuntamente con la resistencia a la compresión, debido a que una menor emisión de CO_2 e/m³ no implica necesariamente una mayor viabilidad técnica.

Con el propósito de integrar el proceso de aprovechamiento y los resultados experimentales y ambientales obtenidos durante la investigación, la Figura 9 presenta un esquema conceptual del aprovechamiento integral de RCD bajo un enfoque de economía circular aplicado a concretos sostenibles de baja resistencia.

El diagrama sintetiza las principales etapas desarrolladas en el estudio, desde la generación y procesamiento de los RCD hasta su clasificación granulométrica en agregado grueso reciclado, agregado fino reciclado y fracción fina menor a la malla No. 200, así como su posterior incorporación y evaluación en nuevas mezclas de concreto. De esta manera, la reincorporación de las diferentes fracciones al ciclo constructivo se plantea en función de su desempeño técnico y ambiental, relacionando la valorización de los residuos con la disminución en la demanda de materias primas convencionales y la reducción potencial del impacto ambiental. El esquema representa, por tanto, un proceso de aprovechamiento condicionado por la viabilidad de cada fracción recuperada y no la recuperación directa de cemento Portland ni la reciclabilidad indefinida de los materiales.

5. Conclusiones

Los resultados obtenidos muestran que la sustitución total de agregados naturales por RCD presenta potencial para la elaboración de concretos de baja resistencia bajo las condiciones evaluadas. A pesar de que el objetivo de diseño establecido fue alcanzar una resistencia a la compresión de f´c = 150 kg/cm^2, ninguna de las mezclas evaluadas alcanzó dicho valor a los 28 días. Sin embargo, la sustitución de agregados naturales por agregados reciclados presentó un comportamiento favorable (M2-R), alcanzando 131.67 kg/cm^2, superior a los 118.23 kg/cm^2 obtenidos por el concreto de referencia (M1-N), lo que evidencia el potencial de los RCD como sustituto de los agregados naturales bajo las condiciones evaluadas. Por otro lado, la incorporación de material cementante reciclado mostró limitaciones conforme aumentó el porcentaje de sustitución. La mezcla con 50 % de sustitución alcanzó una resistencia de 44.77 kg/cm^2 a los 28 días, mientras que la sustitución total del cemento Portland no desarrolló fraguado. Estos resultados permiten establecer que, bajo las condiciones experimentales del estudio y sin un tratamiento de activación, el material cementante reciclado no presenta un desempeño equivalente al cemento Portland cuando se emplea en porcentajes elevados de sustitución.

Desde el punto de vista ambiental, considerando los módulos A1-A5, la sustitución total de agregados naturales por agregados reciclados redujo el impacto de 228.52 a 218.22 kg CO_2 e/m^3, equivalente a una disminución de 4.51 %. Esta reducción se relacionó con la incorporación de agregados provenientes de RCD y con la menor contribución del transporte considerada en la modelación. Por su parte, M3-C-50 presentó un impacto de 111.39 kg CO_2 e/m^3, equivalente a una reducción de 51.26 % respecto a la mezcla de referencia, principalmente por la disminución del contenido de cemento Portland de 0.300 a 0.150 t/m^3. Sin embargo, esta reducción estuvo acompañada de una disminución considerable de la resistencia a la compresión.

El análisis de sensibilidad mediante la incorporación del módulo B1 no modificó el orden ambiental de las mezclas, aunque incrementó la magnitud de las reducciones asociadas con las formulaciones que incorporaron RCD. Por tanto, la comparación ambiental principal se estableció con los módulos A1-A5 y los resultados de B1 se consideraron complementarios.

En conjunto, M2-R presentó el mejor balance entre resistencia a la compresión e impacto ambiental, lo que demuestra el potencial de la sustitución total de agregados naturales por agregados reciclados para la elaboración de concretos de baja resistencia. Los resultados contribuyen al aprovechamiento de los RCD bajo un enfoque de economía circular, pero también evidencian que una menor emisión de CO_2 e/m^3 no implica necesariamente una mayor viabilidad técnica, especialmente cuando se sustituye el cemento Portland por material cementante reciclado.

6. Limitaciones

El estudio se centró específicamente en la evaluación de la resistencia a la compresión, por lo que no se consideraron otros ensayos mecánicos ni otras propiedades relevantes del material, como la durabilidad, el módulo de elasticidad o el comportamiento a largo plazo.

Asimismo, el material cementante reciclado utilizado no fue sometido a procesos de activación ni a una caracterización física, química y mineralógica detallada, lo que limita la comprensión de su potencial de reacción dentro de la mezcla.

Adicionalmente, las condiciones evaluadas corresponden a un rango específico de dosificaciones y materiales, por lo que los resultados obtenidos están sujetos a dichas condiciones experimentales.

En cuanto al análisis de ciclo de vida, la comparación ambiental principal se limitó a los módulos A1-A5, correspondientes al suministro y procesamiento de materias primas, fabricación, transporte y elaboración del concreto. No se incluyeron las etapas de mantenimiento, reparación y operación, ni las actividades correspondientes al fin de vida de los materiales. Por tanto, los resultados representan un análisis parcial del ciclo de vida, enfocado en las etapas consideradas dentro de los límites del sistema.

La modelación ambiental dependió de las declaraciones ambientales de producto y de los conjuntos de datos disponibles en el software. En particular, las 0.150 t de material cementante reciclado incorporadas en M3-C-50 se representaron mediante un conjunto de datos correspondiente a materiales reciclados provenientes de RCD, debido a que no se contó con una declaración ambiental específica para la fracción fina de concreto reciclado. En consecuencia, el impacto calculado para este material constituye una aproximación sujeta al conjunto de datos seleccionado. Asimismo, las distancias de transporte y los factores de emisión corresponden al escenario modelado y pueden variar bajo otras condiciones de suministro y producción.

Finalmente, el módulo B1, correspondiente a la captura estimada de CO_2 por carbonatación, se evaluó únicamente como un escenario de sensibilidad. Por tanto, las conclusiones ambientales principales se establecieron a partir de los módulos A1-A5, mientras que los resultados de B1 se interpretaron como un escenario complementario de modelación.

7. Recomendaciones

Futuras investigaciones podrían enfocarse en la evaluación de otras propiedades del concreto, particularmente aquellas relacionadas con la durabilidad y el comportamiento a largo plazo, con el fin de determinar su viabilidad en aplicaciones estructurales.

Asimismo, se sugiere profundizar en el estudio del material cementante reciclado, particularmente en su caracterización física y química, así como en la evaluación de métodos de activación mecánica, térmica o química que permitan incrementar su capacidad reactiva y mejorar su desempeño dentro de mezclas de concreto.

De igual manera, se propone explorar distintas proporciones de sustitución de materiales reciclados, tanto en agregados como en el componente cementante, con el propósito de identificar configuraciones que permitan alcanzar un balance adecuado entre resistencia a la compresión e impacto ambiental.

Finalmente, se recomienda ampliar el análisis de ciclo de vida mediante la incorporación de las etapas de uso y fin de vida del concreto, así como desarrollar conjuntos de datos

ambientales específicos para el material cementante reciclado. También resulta conveniente evaluar la sensibilidad de los resultados ante variaciones en las distancias de transporte, los factores de emisión y la captura de CO_2 por carbonatación.

Declaración sobre el uso de Inteligencia Artificial generativa y tecnologías asistidas por IA

Durante la preparación del presente manuscrito, los autores utilizaron Grammarly como herramienta de apoyo para la mejora de la redacción y la corrección gramatical, así como ChatGPT (OpenAI) para la traducción al inglés del resumen y las palabras clave. Todo el contenido generado o sugerido por estas herramientas fue revisado y editado por los autores, quienes asumen plena responsabilidad por la exactitud, originalidad, integridad y rigor científico del contenido final del manuscrito.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería y al Laboratorio de Materiales del Área Académica de Ingeniería y Arquitectura por las facilidades proporcionadas para el desarrollo experimental de esta investigación. Asimismo, agradece el apoyo técnico y académico brindado durante la ejecución del estudio.

Referencias

American Concrete Institute. (2022). ACI PRC-211.1-22: Selecting Proportions for Normal-Density and High-Density Concrete—Guide. Consultado desde: https://www.concrete.org/store/productdetail.aspx?ItemID=211122

ASTM International. (2008). Preparación y Curado de Especímenes de Ensayo de Concreto en la Obra (ASTM C31/C31 M). Consultado desde: https://store.astm.org/c0031_c0031m-23.html

ASTM International. (2015). Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate (ASTM C127-15). Consultado desde: https://ensayosdelaboratoriosuelos.wordpress.com/wp-content/uploads/2015/12/astm-c-127.pdf

ASTM International. (2015). Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate (ASTM C128-15). Consultado desde: https://store.astm.org/standards/c128

ASTM International, (2018). Standard Specification for Concrete Aggregates (ASTM C33/C33M-18). Consultado desde: https://store.astm.org/c0033_c0033m-18.html

ASTM International. (2019). Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates (ASTM C136/C136M-19). Consultado desde: https://store.astm.org/c0136-06.html

ASTM International. (2019). Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete (ASTM C143/C143M-08). Consultado desde: https://store.astm.org/c0143_c0143m-08.html

ASTM International. (2019). Práctica estándar para el muestreo de agregados (ASTM D75/D75M-19). Consultado desde: https://store.astm.org/d0075_d0075m-19.html

ASTM International. (2021). Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens (ASTM C39/C39M-21). Consultado desde: https://store.astm.org/c0039_c0039m-05e01.html

Adame, I. M. (2025). Implementación de RCD en concretos estructurales. [Licenciatura, Universidad Autónoma de Querétaro]. Consultado desde: https://ri-ng.uaq.mx/handle/123456789/11659

Cementos Cruz Azul. (s. f.). Cemento Tipo II CPC 30R RS [Ficha técnica]. Consultado desde: https://distribuidoragales.com/wp-content/uploads/2024/01/FT_Cemento-CPC.pdf

Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción. (2013). Plan de Manejo de Residuos de la Construcción y la Demolición [Informe]. cmic. Consultado desde: https://www.cmic.org.mx/comisiones/sectoriales/medioambiente/flayer/PM%20RCD%20Completo.pdf

Evangelista, L., & De Brito, J. (2007). Comportamiento mecánico del hormigón hecho con agregados finos de hormigón reciclado. Cement and concrete composites, 29 (5), 397-401. Consultado desde: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0958946507000030

Habert, G., Miller, S., Juan, V., Provis, J., Favier, A., Horvath, A., & Escribano, K. (2020). Environmental impacts and decarbonization strategies in the cement and concrete industries. Nature Reviews Earth & Environment, 1(1). Consultado desde: https://www.nature.com/articles/s43017-020-0093-3

Hussein, H., Farid, A., Kenneth, T., & Bassam, T. (2025). Utilización de arena del desierto en bruto como árido fino sostenible: Impacto en el rendimiento del hormigón y beneficios medioambientales. Int J Concr Struct Mater, 19(110). Consultado desde: https://link.springer.com/article/10.1186/s40069-025-00853-6#citeas

Kim, J., & Ubysz, A. (2024). Thermal activation of multi-recycled concrete powder as supplementary cementitious material for repeated and waste-free recycling. Journal of Building Engineering, 98, 111169. Consultado desde: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710224027372

Li, S., Gao, J., Li, Q., & Zhao, X. (2021). Investigation of using recycled powder from the preparation of recycled aggregate as a supplementary cementitious material. Construction and Building Materials, 267, 120976. Consultado desde: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061820329810

Litiano, M. & Ramirez, A. (2024). Sustitución parcial del agregado grueso por residuos de construcción y demolición (RCD) en concreto de 140 kg/cm^2 para falsas zapatas como solución al manejo inadecuado de residuos de construcción en Lima, Perú [Licenciatura, Universidad Peruana De Ciencias Aplicadas]. Consultado desde: https://repositorioacademico.upc.edu.pe/handle/10757/683200

Morales, R., Olivera, A., Jiménez, V., Gallegos, P., Espinoza, J., & Montes, P. (2024). Reutilización de residuos industriales como agregado fino para morteros ecológicos. XI Congreso Nacional de Alconpat México, 2024(1), 154-164. Consultado desde: https://alconpat.org/assets/docs/xcongresoamx/Memorias_XICNAM_2024.pdf

Poon, C. S., Shui, Z. H., & Lam, L. (2004). Effect of microstructure of ITZ on compressive strength of concrete prepared with recycled aggregates. Construction and building materials, 18(6), 461-468. Consultado desde: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061804000388

Prošek, Z., Trejbal, J., Nežerka, V., Goliáš, V., Faltus, M., & Tesárek, P. (2020). Recovery of residual anhydrous clinker in finely ground recycled concrete. *Resources, Conservation and Recycling*, *155*, 104640. Consultado desde: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344919305464

Rocha, J. H. A., & Toledo Filho, R. D. (2023). The utilization of recycled concrete powder as supplementary cementitious material in cement-based materials: A systematic literature review. Journal of Building Engineering, 76, 107319. Consultado desde: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710223014997

Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México. (2024). Recupera Ciudad de México más de 47 mil toneladas de Residuos de la Construcción y Demolición [Gubernamental]. Ciudad de México Capital de la Transformación. Consultado desde: https://www.sedema.cdmx.gob.mx/comunicacion/nota/recupera-ciudad-de-mexico-mas-de-47-mil-toneladas-de-residuos-de-la-construccion-y-demolicion

Silva, R., De Brito, J., & Dhir, R. (2014). The influence of the use of recycled aggregates on the compressive strength of concrete: a review. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 19(7), 825–849. Consultado desde: https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/19648189.2014.974831

Urrego, Y. & Arjona, S. (2020). Uso de residuos de construcción y demolición como material cementicio suplementario y agregado grueso reciclado en concretos autocompactantes (Informe Técnico No. 85; 1, p. 14). Universidad del Valle. Consultado desde: https://revistas.sena.edu.co/index.php/inf_tec/article/view/2502/3799

Wang, Q., Zhao, Y., Sun, L., Zheng, H., & Liang, X. (2024). Exploring economic and environmental impacts of recycled aggregate concrete using particle swarm optimization algorithm. Journal of Cleaner Production, 475. Consultado desde: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652624031627?via%3Dihub

Watari, T., Cao, Z., Serrenho, A., & Cullen, J. (2023). Growing role of concrete in sand and climate crises. iScience, 26(106782). Consultado desde: https://www.cell.com/iscience/fulltext/S2589-0042(23)00859-

3?_returnURL=https%3A%2F%2Flinkinghub.elsevier.com%2Fretrieve%2Fpii%2FS2589004223008593%3Fshowall%3Dtrue

Zhang, P., Sun, X., Wang, F., & Wang, J. (2023). Mechanical properties and durability of geopolymer recycled aggregate concrete: A review. Polymers, 15(3), 615. Consultado desde: https://www.mdpi.com/2073-4360/15/3/615

Zhu, P., Mao, X., & Qu, W. (2019). Investigation of recycled powder as supplementary cementitious material. Magazine of Concrete Research, 71(24), 1312-1324. Consultado desde: https://www.emerald.com/jmacr/article/71/24/1312/429927