



ARTÍCULO ORIGINAL

Desempeño mecánico de concretos modificados con agregado grueso reciclado

Pablo Julián López-González^{1*}, Oscar Moreno-Vázquez¹, Joaquín Sangabriel-Lomelí¹, Arturo Cabrera-Hernández¹, Fátima Jardines-Villagrán², José de Jesús Roa-González³

¹Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Misantla, Km 1.8 Carretera a Loma del Cojolite, Misantla 93821, México.

²ICA FLUOR DANIEL S. DE R.L DE C.V, Dakota 95, Nápoles, 03810 Ciudad de México, México.

³ConstrucRoa, Veracruz, Calle Benito Juárez #703, Papatla 93419, México.

Recepción 29 de julio de 2024. Aceptación 18 de diciembre de 2024.

PALABRAS CLAVE

Agregado, Concreto,
Reciclado.

Resumen

Este estudio evaluó el efecto de la sustitución parcial del agregado grueso con residuo de construcción para la obtención de resistencia a la compresión en concretos hidráulicos convencionales y modificados. Se elaboraron especímenes cilíndricos de 15 cm de diámetro x 30 cm de altura, diseñando mezclas por el método ACI 211.1 con 10%, 20% y 30% de reemplazo de la masa, y se compararon con un concreto de referencia, sometiéndolos a pruebas de resistencia a la edad de 7, 14 y 28 días de curado, con base a la normativa ONNCCE. Los resultados de las pruebas de compresión a los 28 días indicaron que la sustitución del 20% tuvo un efecto similar en la resistencia al concreto de referencia, mientras que los reemplazos del 10% y 30% en las mezclas, presentaron un aumento en la resistencia mecánica en 27% y 20% respectivamente al concreto control. Estos hallazgos resaltan la importancia del aprovechamiento de residuos de construcción para optimizar la dosificación de las mezclas para obtener un buen desempeño.

KEYWORDS

Aggregate, Concrete, Recycled.

Abstract

This study evaluated the effect of partial substitution of coarse aggregate with construction residue to obtain compressive strength in conventional and modified hydraulic concretes. Cylindrical specimens of 15 cm diameter x 30 cm height were elaborated, designing mixtures by the ACI 211.1 method with 10%, 20% and 30% mass replacement, and compared with a reference concrete, subjecting them to resistance tests at the age of 7, 14 and 28 days of curing, based on the ONNCCE regulations. The results of the compression tests at 28 days indicated that the 20% substitution had a similar effect on the resistance to the reference concrete, while the 10% and 30% replacements in the mixtures presented an increase in mechanical resistance by 27% and 20% respectively to the control concrete. These findings highlight the importance of taking advantage of construction waste to optimize the dosage of mixtures to obtain good performance.

Introducción

En la industria de la construcción, el concreto es un material compuesto elaborado a base de cemento Portland (CP). Su versatilidad lo ha posicionado como el material de elección para la elaboración de una amplia gama de infraestructuras¹. La fabricación de concreto generalmente involucra la combinación de agregados pétreos, agua y CP, a los que ocasionalmente se añaden aditivos para modular sus propiedades².

La industria de la construcción es un alto consumidor de recursos naturales provenientes de canteras y bancos de agregados con una demanda constante de materiales como arena y grava, así como el empleo de calizas y arcillas para la elaboración de cemento, lo cual ejerce una presión significativa sobre el medio ambiente y está intrínsecamente ligado a un gasto energético considerable³.

En la infraestructura al transcurrir el tiempo de vida útil, las estructuras de concreto generan una considerable cantidad de residuos sólidos^{4,5}. Estos desechos representan un desafío ambiental significativo, ocupando espacio en vertederos y demandando recursos para su disposición final. Sin embargo, estos materiales residuales poseen un valor intrínseco que puede ser aprovechado^{6,7}.

Mediante procesos de trituración y clasificación, los residuos de concreto pueden transformarse en agregados reciclados, aptos para la elaboración de concreto hidráulico sostenible⁸, contribuyendo así a la circularidad de los materiales de construcción^{9,10}, reduciendo la demanda de recursos naturales, disminuyendo la generación de desechos sólidos y abaratando los costos de construcción^{11,12}. No obstante, para adoptar esta práctica a nivel local, es crucial comprender las propiedades de estos agregados reciclados e identificar tanto las ventajas como los posibles inconvenientes que puedan aportar al nuevo concreto¹³.

La implementación y producción del concreto reciclado en la industria de la construcción se ve limitada por la necesidad de desarrollar diseños que aseguren una optimización de sus propiedades mecánicas bajo cargas estáticas y dinámicas. Por ello, es imperativo llevar a cabo investigaciones que determinen las relaciones entre la composición del concreto reciclado, los parámetros de

mezcla y las propiedades mecánicas, como es el caso de la resistencia a compresión, con el objetivo de establecer criterios de diseño robustos¹⁴.

El objetivo de este estudio es evaluar y analizar el comportamiento mecánico de probetas de concreto modificadas mediante la sustitución parcial de agregados naturales por agregados reciclados, obtenidos de concreto demolido producto de pavimentación en Poza Rica, Veracruz, México, para su posible uso en la industria de la construcción, buscando obtener un concreto modificado con comportamiento similar al convencional.

Material y métodos**Grava y arena**

Se utilizaron agregados gruesos (gravas) y finos (arenas) que cumplieron con los requisitos de muestreo alterado en la Normativa NMX-C-030-ONNCCE-2004¹⁵. En el caso del agregado grueso natural, se realizó ensayo granulométrico mediante la Norma NMX-C-077-ONNCCE-2019¹⁶ para la obtención de un Tamaño Máximo Nominal (TMN) de 19 mm, presentó una absorción de agua de 3.70%, una densidad relativa de 1.91 de acuerdo con el procedimiento de la norma NMX-C-164-ONNCCE-2014¹⁷ y un peso volumétrico de 1554 kg/m³, conforme a la norma NMX-C-073-ONNCCE-2004¹⁸. Por su parte, el agregado fino natural exhibió con base a los procedimientos de la normativa NMX-C-165-ONNCCE-2020¹⁹ una densidad de 1840 kg/m³, una absorción de agua de 12.20%, con el ensayo de su granulometría reporta un módulo de finura de 3.00 y un peso volumétrico de 1460 kg/m³.

Cemento

El cemento empleado fue Cemento Portland Compuesto, Clase Resistente 30 de Resistencia Rápida y Resistente a los Sulfatos (CPC 30 R RS), conforme a la Norma Mexicana NMX-C-414-ONNCCE-2017²⁰.

Agregado reciclado

Como agregado grueso reciclado, se empleó material proveniente de la molienda primaria de concreto demolido producto de pavimentación de Poza Rica, Veracruz, México. Tras un proceso de selección y limpieza, se realizó molienda manual empleando herramienta como, martillos, cincales y marros, realizando un tamizado por malla 3/4", para seleccionar las partículas con un tamaño máximo nominal de 19 mm similar al agregado convencional, las cuales

presentaron una distribución granulométrica uniforme, además se realizaron pruebas de caracterización física como en el caso de las gravas, para la obtención de pesos volumétricos, densidad y absorción conforme a la normativa ONNCCE anteriormente descrita en el apartado de grava y arena.

Métodos experimentales

En este estudio se evaluaron mezclas de concreto, diseñadas con base a la metodología ACI 211.1 para un volumen de 1 m³ con resistencia moderada a 100 Kg/cm², haciendo el ajuste conforme al número de especímenes elaborados. En la tabla 1, se presentan las 4 mezclas utilizadas en este estudio, destacando una muestra control con materiales convencionales, la mezclas 2, 3 y 4 sustituyen el agregado grueso en un 10%, 20% y 30% de su masa por material reciclado de concreto demolido.

Tabla 1. Sustitución de agregado en mezclas de concreto

No de mezcla	Nomenclatura	% Grava	% Reciclado
1	CONTROL	100	0
2	C10%	90	10
3	C20%	80	20
4	C30%	70	30

Para determinar la resistencia a la compresión, se utilizaron 36 cilindros de concreto con dimensiones de 150 mm de diámetro y 300 mm de altura. Se fabricaron 9 probetas por cada mezcla, considerando el ensayo de 3 cilindros por edad (7, 14 y 28 días), presentado en la Tabla 2.

Tabla 2. Número de especímenes para cada diseño experimental

Tipo de espécimen	Ensayo	Edad de ensayo (Días)	Número de especímenes por edad
Cilindros 150 mm x 300mm (9 por cada mezcla)	Resistencia a compresión	7, 14, 28	3

Elaboración de mezclas

Las mezclas de concreto se elaboraron de acuerdo con las proporciones indicadas en la Tabla 1. Los materiales se dosificaron en seco y se mezclaron manualmente. Posteriormente, se agregó el agua y se mezcló hasta obtener una mezcla homogénea.

Las probetas se vibraron en moldes metálicos previamente lubricados con aceite mineral para facilitar el desmolde de las probetas y se curaron a temperatura ambiente durante 24 horas. Posteriormente, se desmoldaron y sumergieron en agua a temperatura ambiente hasta las edades de ensayo (7, 14 y 28 días), conforme a la normativa NMX-C-159-ONNCCE-2016²¹.

Al alcanzar la edad de ensayo, las probetas se extrajeron de los tanques de curado y se prepararon para el ensayo de compresión.

Resistencia a compresión

Para garantizar la precisión de los resultados, se procedió a la limpieza de las superficies de las probetas, eliminando cualquier residuo o adherencia. Posteriormente, las caras de las probetas que entrarían en contacto con las placas de la máquina de ensayos se les aplicó una capa delgada de azufre para mejorar la transferencia de carga durante el ensayo con base la norma NMX-C-109-ONNCCE-2013²².

En cada espécimen se midió la resistencia a compresión ($f'c$) conforme a lo establecido en la norma NMX-C-083-ONNCCE-2014²³, a la edad de 7, 17 y 28 días de curado. En la prueba se utiliza una prensa hidráulica marca TouchSOLO con el número de serie 1887-100760, la cual en cada una de las muestras aplicó una carga de 200 kgf/seg., ubicada en el laboratorio de Ingeniería civil de la Universidad Veracruzana, campus Poza Rica.

Resultados

Las propiedades de los agregados se determinaron mediante una caracterización física completa, cuyos resultados se presentan en la Tabla 3. En ella se incluyen parámetros clave como el peso volumétrico seco suelto (PVSS) y el peso volumétrico seco compacto (PVSC), siendo este último el parámetro de diseño de mezclas debido al acomodo de las partículas, con valores de 1554.00 kg/m³ para la grava y 1282.09 kg/m³ para la arena. Asimismo, se reporta el tamaño máximo nominal (TMN) de 19 mm de la grava utilizada y el módulo de finura de la arena, que se encuentra en el intervalo de 2.2 a 3.1 como concreto estructural, cada destacar que esta medida es adimensional. Cabe destacar que propiedades físicas como la densidad y la absorción son esenciales para determinar los pesos precisos de los materiales en la dosificación por el método ACI 211.1. Estos datos resultan fundamentales para establecer las relaciones entre las propiedades de los agregados, las características y comportamiento del concreto.

Tabla 3. Valores de la caracterización de agregados

Parámetro	Arena	Grava	Reciclado
PVSS (kg/m ³)	1277.20	1490.98	775.35
PVSC (kg/m ³)	1282.09	1554.00	821.33
TMN (mm)	-	19	19
Densidad (kg/m ³)	1840.00	1911.00	1969.03
Absorción (%)	12.20	3.70	18.70
Módulo de finura	3.00	-	-

En la Tabla 4 se presentan las proporciones de las mezclas de concreto diseñadas según el método ACI 211.1, cuyo objetivo es evaluar el impacto de un material residual empleado como sustituto parcial de la grava. Las mezclas se clasificaron en una mezcla de control, sin incorporación de residuo, y tres mezclas experimentales identificadas como C10%, C20% y C30%, las cuales contienen sustituciones del 10%, 20% y 30% de grava por residuo, respectivamente.

Tabla 4. Dosificación de mezclas

Dosificación ACI 211.1					
Mezcla	Agua (kg)	Grava (kg)	Arena (kg)	CP (kg)	Residuo (kg)
CONTROL	48.89	150.55	145.03	66.30	0
C10%	48.89	135.49	145.03	66.30	15.05
C20%	48.89	120.44	145.03	66.30	30.11
C30%	48.89	105.38	145.03	66.30	45.16

En la figura 1, se observa la resistencia a la compresión de las diferentes mezclas de concreto, en función del porcentaje de sustitución del agregado por material reciclado. Todas las mezclas muestran un desarrollo inicial de resistencia adecuado, aunque las mezclas con mayor porcentaje de sustitución (C20% y C30%) presentan valores ligeramente inferiores en comparación con la mezcla de control.

La mezcla C10% tiene un comportamiento similar al de la mezcla de control, lo que sugiere que bajas proporciones de sustitución no afectan significativamente la resistencia inicial.

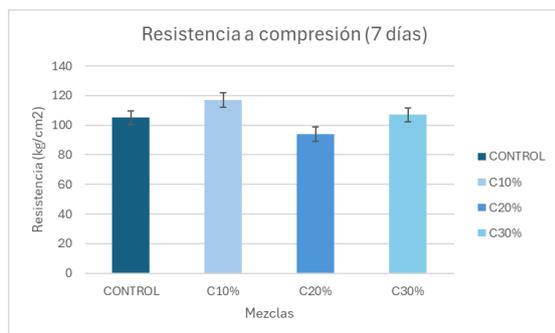


Figura 1. Resistencia a compresión a 7 días

En la figura 2, se alcanza la resistencia típica del concreto, con una tendencia decreciente al aumentar el porcentaje de sustitución. La mezcla C10% presenta valores inferiores a la mezcla de control, mientras que las mezclas C20% y C30% muestran una mejora en su resistencia.

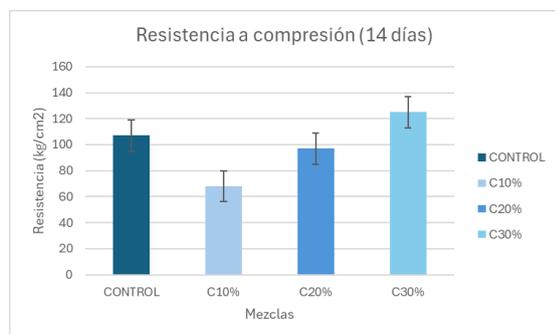


Figura 2. Resistencia a compresión a 14 días

En la figura 3 se puede observar que alrededor de los 28 días de experimentación, la mezcla con 20% de sustitución presentó una resistencia similar a la mezcla convencional,

las mezclas de 10% y 30% de sustitución presentaron una mayor resistencia a la compresión en comparación con la mezcla de control. Todas las mezclas exhiben un incremento en la resistencia a largo plazo, lo que indica un adecuado proceso de hidratación y ganancia de propiedades mecánicas. Los resultados de la Figura 3, muestran que la sustitución parcial del agregado grueso por material reciclado puede afectar la resistencia del concreto de manera positiva o negativa. Este efecto depende del porcentaje de sustitución utilizado.

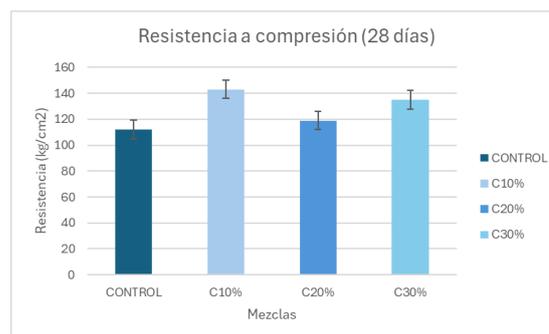


Figura 3. Resistencia a compresión a 28 días

Discusión

La utilización de concreto demolido favorece la implementación de un modelo de economía circular, al cerrar el ciclo de vida de los materiales²⁴. En este contexto, el ciclo de vida se refiere a todas las etapas de un material, desde su extracción, producción, uso, hasta su disposición final. Al reutilizar el concreto demolido, se reduce la necesidad de extraer y procesar nuevos recursos naturales, lo que disminuye la demanda de materiales vírgenes. De este modo, se evita el desperdicio, se alarga la vida útil de los materiales existentes y se disminuye el impacto ambiental, contribuyendo a un uso más eficiente y sostenible de los recursos²⁵. Al utilizar residuos como agregados en nuevas mezclas de concreto, se logran varios beneficios ambientales interrelacionados. Primero, se minimiza la generación de residuos sólidos al reutilizar materiales que de otro modo serían desechados, reduciendo la cantidad de desechos que terminan en vertederos. Esto contribuye a una gestión más eficiente de los recursos. Segundo, al reducir la extracción de materiales naturales para la producción de nuevos agregados, se conserva la biodiversidad. La minería y extracción de recursos naturales suelen tener un impacto negativo en los ecosistemas, como la destrucción de hábitats y la alteración de la fauna y flora locales. Al disminuir esta actividad, se ayuda a proteger estos ecosistemas. Finalmente, al sustituir los materiales naturales por residuos reciclados, se mitiga el impacto ambiental asociado con el proceso de extracción y procesamiento de esos recursos. Estos procesos suelen generar grandes cantidades de emisiones de CO₂ y otros contaminantes. La reutilización de materiales reduce la necesidad de procesos industriales intensivos, lo que disminuye la huella de carbono y otros impactos negativos en el medio ambiente²⁶.

Los resultados obtenidos en este estudio destacan la complejidad de diseñar mezclas óptimas de concreto reciclado, evidenciando la influencia de factores como la proporción de sustitución de agregados y las características del material reciclado. Estos hallazgos son cruciales para avanzar en el desarrollo de concretos sostenibles, alineándose con los objetivos de la investigación de optimizar el rendimiento del concreto utilizando materiales

reciclados sin comprometer sus propiedades mecánicas. La interacción entre variables como el porcentaje de material reciclado, la granulometría y la relación agua-cemento influye significativamente en las propiedades finales del concreto ²⁷. Esto se evidenció en las resistencias a la compresión obtenidas para las mezclas con 10% y 30% de sustitución, las cuales superaron las resistencias de la mezcla de control.

Los porcentajes de mezcla obtenidos en este estudio coinciden con los hallazgos de investigaciones previas, que sugieren que un reemplazo de hasta el 30% del agregado convencional por material reciclado puede alcanzar un buen desempeño en términos de resistencia a la compresión ²⁸. Sin embargo, la disminución en la resistencia observada a un 20% de sustitución podría atribuirse a factores como la morfología irregular de las partículas recicladas, la variabilidad en la calidad de los materiales reciclados y la mayor capacidad de adsorción de agua de estos agregados. Estudios previos han indicado que las partículas recicladas, debido a su forma y textura áspera, pueden presentar una menor adherencia con la matriz cementicia, lo que afecta negativamente la resistencia del concreto ²⁹. Además, la mayor capacidad de absorción de agua de los agregados reciclados puede alterar la relación agua-cemento, reduciendo la eficiencia del proceso de hidratación y, por ende, la resistencia final del concreto ³⁰. Los estudios futuros deben centrarse en una caracterización más detallada de los materiales reciclados y en la optimización de las dosificaciones, con el fin de mejorar la predictibilidad del comportamiento del concreto reciclado.

Conclusiones

Este estudio examina el comportamiento de la resistencia a la compresión de concreto hidráulico elaborado con agregado reciclado. Los resultados obtenidos indican que, al reemplazar entre un 10% y un 30% del agregado convencional por residuo de construcción, es posible alcanzar resistencias a la compresión comparables a las de las mezclas convencionales, cuyo diseño está orientado a obtener una resistencia de 100 kg/cm². Es particularmente destacable que las mezclas con un 10% y un 30% de sustitución de agregado reciclado mostraron un aumento significativo en la resistencia mecánica, alcanzando incrementos del 27% y 20%, respectivamente, en comparación con la mezcla de control. Estos hallazgos demuestran que, dentro de este rango de sustitución, el concreto reciclado no solo mantiene un rendimiento adecuado, sino que incluso mejora en algunas proporciones, lo que subraya su viabilidad como alternativa sostenible y rentable en la construcción. Al utilizar residuos de construcción como agregado, se puede reducir la demanda de recursos naturales sin comprometer las propiedades mecánicas esenciales del concreto, lo que refuerza el potencial del concreto reciclado como una opción viable para aplicaciones estructurales.

Contribución de los autores

PJLG, redacción, diseño de mezcla.
OMV, diseño y recolección de datos.
JSL, análisis estadístico y redacción.
ACH, redacción y análisis estadísticos.
FJV, trabajo de campo y ensayos en estado fresco.
JJRG, trabajo de campo y ensayos en estado endurecido.

Financiamiento

El primer autor da las gracias al consorcio GEMex-CONACYT por el cual se me apoyó económicamente durante la estancia.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Presentaciones previas

Ninguna.

Referencias

1. Kujawa, W., Olewnik-Kruszkowska, E., & Nowaczyk, J. (2021). Concrete strengthening by introducing polymer-based additives into the cement matrix—A mini review. *Materials*, 14(20), 6071.
2. Ponce del Cid, C. A. (2022). Evaluación comparativa de la huella de carbono en la producción de cemento puzolánico y cemento a base de arcillas activadas térmicamente en una empresa cementera de Guatemala (Doctoral dissertation, Universidad de San Carlos de Guatemala).
3. Montoya, G. A. P. (2024). Innovación para construcción sostenible: estudio piloto de concreto modificado con plástico reciclado. *Innovare Revista de ciencia y tecnología*, 13(1), 2-7. Kryeziu, D., Selmani, F., Mujaj, A., & Kondi, I. (2023). Recycled concrete aggregates: a promising and sustainable option for the construction industry. *Journal of Human, Earth, and Future*, 4(2), 166-180.
4. Akhtar, A., & Sarmah, A. K. (2018). Construction and demolition waste generation and properties of recycled aggregate concrete: A global perspective. *Journal of Cleaner Production*, 186, 262-281.
5. Nalon, G. H., Santos, R. F., de Lima, G. E. S., Andrade, I. K. R., Pedroti, L. G., Ribeiro, J. C. L., & de Carvalho, J. M. F. (2022). Recycling waste materials to produce self-sensing concretes for smart and sustainable structures: A review. *Construction and Building Materials*, 325, 126658.
6. Bohórquez Pérez, P. A. (2023). Análisis de la viabilidad para la producción sostenible de concreto a partir de agregados reciclados, provenientes de residuos de

- construcción y demolición en Prevesa SAS-Girón, Santander (Master's thesis, Escuela de Ingeniería).
7. Bonoli, A., Zanni, S., & Serrano-Bernardo, F. (2021). Sustainability in building and construction within the framework of circular cities and european new green deal. The contribution of concrete recycling. *Sustainability*, 13(4), 2139.
 8. Kirthika, S. K., Singh, S. K., & Chourasia, A. (2020). Alternative fine aggregates in production of sustainable concrete-A review. *Journal of cleaner production*, 268, 122089.
 9. Makul, N., Fediuk, R., Amran, M., Zeyad, A. M., Murali, G., Vatin, N., ... & Vasilev, Y. (2021). Use of recycled concrete aggregates in production of green cement-based concrete composites: A review. *Crystals*, 11(3), 232.
 10. Collivignarelli, M. C., Cillari, G., Ricciardi, P., Miino, M. C., Torretta, V., Rada, E. C., & Abbà, A. (2020). The production of sustainable concrete with the use of alternative aggregates: A review. *Sustainability*, 12(19), 7903.
 11. Wang, B., Yan, L., Fu, Q., & Kasal, B. (2021). A comprehensive review on recycled aggregate and recycled aggregate concrete. *Resources, Conservation and Recycling*, 171, 105565.
 12. Reis, G. S. D., Quattrone, M., Ambrós, W. M., Grigore Cazacliu, B., & Hoffmann Sampaio, C. (2021). Current applications of recycled aggregates from construction and demolition: A review. *Materials*, 14(7), 1700.
 13. Menna, C., Mata-Falcón, J., Bos, F. P., Vantighem, G., Ferrara, L., Asprone, D., ... & Kaufmann, W. (2020). Opportunities and challenges for structural engineering of digitally fabricated concrete. *Cement and Concrete Research*, 133, 106079.
 14. Martínez-Molina, W., Torres-Acosta, A. A., Alonso-Guzmán, E. M., Chávez-García, H. L., Hernández-Barrios, H., Lara-Gómez, C., ... & González-Valdéz, F. M. (2015). Concreto reciclado: una revisión. *Revista Alconpat*, 5(3), 235-248.
 15. ONNCCE. (2004). *NMX-C-030-ONNCCE-2004: Industria de la Construcción - Agregados - Muestreo*. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C.
 16. ONNCCE. (2019). *NMX-C-077-ONNCCE-2019: Industria de la Construcción - Agregados para Concreto - Análisis Granulométrico - Método de Ensayo*. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C.
 17. ONNCCE. (2014). *NMX-C-164-ONNCCE-2014: Industria de la Construcción - Agregados - Determinación de la Densidad Relativa y Absorción de Agua del Agregado Grueso*. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C.
 18. ONNCCE. (2004). *NMX-C-073-ONNCCE-2004: Industria de la Construcción - Agregados - Masa Volumétrica - Método de Prueba*. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C.
 19. ONNCCE. (2020). *NMX-C-165-ONNCCE-2020: Industria de la Construcción - Agregados - Determinación de la Densidad Relativa y Absorción de Agua del Agregado Fino*. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C.
 20. ONNCCE. (2017). *NMX-C-414-ONNCCE-2017: Industria de la construcción - Cementantes hidráulicos - Especificaciones y métodos de ensayo*. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C.
 21. ONNCCE. (2016). *NMX-C-159-ONNCCE-2016: Industria de la Construcción - Concreto - Elaboración y Curado de Especímenes de Ensayo*. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C.
 22. ONNCCE. (2013). *NMX-C-109-ONNCCE-2013: Industria de la Construcción - Concreto Hidráulico - Cabeceo de Especímenes*. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C.
 23. ONNCCE. (2014). *NMX-C-083-ONNCCE-2014: Industria de la Construcción - Concreto - Determinación de la Resistencia a la Compresión de Especímenes - Método de Ensayo*. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C.
 24. Marsh, A. T., Velenturf, A. P., & Bernal, S. A. (2022). Circular Economy strategies for concrete: implementation and integration. *Journal of Cleaner Production*, 362, 132486.
 25. Zhang, Z., Malik, M. Z., Khan, A., Ali, N., Malik, S., & Bilal, M. (2022). Environmental impacts of hazardous waste, and management strategies to reconcile circular economy and eco-sustainability. *Science of The Total Environment*, 807, 150856.
 26. Mistri, A., Dhami, N., Bhattacharyya, S. K., Barai, S. V., Mukherjee, A., & Biswas, W. K. (2021). Environmental implications of the use of bio-cement treated recycled aggregate in concrete. *Resources, Conservation and Recycling*, 167, 105436.
 27. Kou, S. C., Poon, C. S., & Etxeberria, M. (2011). Influence of recycled aggregates on long term mechanical properties and pore size distribution of concrete. *Cement & Concrete Composites* 33, 286-291
 28. Cabral, A. E. B., Schalch, V., Dal Molin, D. C. C., & Ribeiro, J. L. D. (2010). Mechanical properties modeling of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 24(4), 421-430.
 29. Smith, J., et al. (2015). "Effects of recycled aggregates

on the mechanical properties of concrete." *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27(4), 04015034.

30. Lee, H., et al. (2017). "Impact of water absorption of recycled aggregates on the concrete mix design." *Materials and Structures*, 50(1), 98.