

Tipo de artículo: Artículo original

# Simulación computacional de criterio de durabilidad de hormigones fabricados con residuos de la construcción y demolición por clasificación de sólidos

## *Computational simulation of durability criteria of concretes manufactured with construction and demolition waste by solids classification*

Francisco Emilio Cevallos Veliz<sup>1\*</sup> , <https://orcid.org/0000-0001-6791-4139>

Byron Baque Campozano<sup>2</sup> , <https://orcid.org/0000-0001-9701-2179>

Erik Gabriel Villavicencio Cedeño<sup>3</sup> , <https://orcid.org/0000-0002-1887-5599>

<sup>1</sup> Estudiante de la carrera de Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias Técnicas, Universidad Estatal del Sur de Manabí, UNESUM, Jipijapa, Manabí, Ecuador. [cevallos-francisco0923@unesum.edu.ec](mailto:cevallos-francisco0923@unesum.edu.ec)

<sup>2</sup> Carrera de Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias Técnicas, Universidad Estatal del Sur de Manabí, UNESUM, Jipijapa, Manabí, Ecuador.

<sup>3</sup> Carrera de Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias Técnicas, Universidad Estatal del Sur de Manabí, UNESUM, Jipijapa, Manabí, Ecuador.

\* Autor para correspondencia: [cevallos-francisco0923@unesum.edu.ec](mailto:cevallos-francisco0923@unesum.edu.ec)

### Resumen

La recuperación y reciclado de hormigones es parte imprescindible para conseguir y compatibilizar el desarrollo constructivo-económico de la sociedad con la preservación del medio ambiente. En el presente trabajo se describe el proceso de reciclaje de hormigones y los principales factores que pueden afectar la durabilidad en los elementos elaborados con hormigones reciclados, señalándose como significativos el porcentaje de sustitución de los áridos, la relación agua/cemento y la cantidad de mortero adherido en los áridos reciclado. Mediante un enfoque mixto que complementa el método deductivo con el método bibliográfico mediante el manejo de una amplia fuente de bibliografía, se hace un análisis de los factores principales que condicionan la durabilidad de hormigones fabricados con residuos de la construcción y demolición por clasificación de sólidos. De los factores determinantes, tanto la permeabilidad como la porosidad pueden ser limitadas por un meticuloso tratamiento de los residuos del hormigón reciclado al lograrse una alta depuración de fracciones no útiles. Se ha encontrado como límite máximo de sustitución de áridos reciclados hasta el 20% del árido natural, señalándose por varios autores que superarlo produce afectaciones significativas comprometiendo la resistencia. En su mayoría, los autores aconsejan que los procesos de reutilización deben siempre ser acompañados de procesos de comprobación.

**Palabras clave:** hormigón reciclado; criterio de durabilidad; áridos reciclados.

### Abstract

*The recovery and recycling of concrete is an essential part to achieve and reconcile the constructive-economic development of society with the preservation of the environment. The present work describes the concrete recycling process and the main factors that can affect the durability of the elements made with recycled concrete, indicating the percentage of substitution of aggregates, the water/cement ratio and the amount of mortar as significant adhered to recycled aggregates. Through a mixed approach that complements the deductive method with the bibliographic method by handling a wide source of bibliography, an analysis is made*



Esta obra está bajo una licencia *Creative Commons* de tipo **Atribución 4.0 Internacional** (CC BY 4.0)

*of the main factors that determine the durability of concretes manufactured with construction and demolition waste by solids classification. Of the determining factors, both permeability and porosity can be limited by a meticulous treatment of recycled concrete residues to achieve a high purification of non-useful fractions. Up to 20% of the natural aggregate has been found as the maximum substitution limit for recycled aggregates, indicating by several authors that exceeding it produces significant effects, compromising resistance. For the most part, the authors advise that reuse processes should always be accompanied by verification processes.*

**Keywords:** recycled concrete; durability criteria; recycled aggregates.

**Recibido:** 11/10/2021

**Aceptado:** 22/12/2020

## Introducción

El hormigón es el material por elección para la construcción de una gran variedad de estructuras en el mundo pues su gran durabilidad, versatilidad y la alta resistencia, fruto de la unión del árido con una matriz cementosa, que le confiere gran importancia y aplicabilidad. Su producción anual promedia los 10 km<sup>3</sup> (Reynosa et al., 2017).

Los especialistas estiman que por la demanda constructiva mundial la cifra tenga una tendencia a crecer y de la misma forma la huella ecológica debido a los altos costos medioambientales también se profundice. Dentro de los impactos más nocivos se destacan no solo la generación de desechos constructivos por renovación, sino además, la enorme cantidad de energía consumida, la emisión de gases a la atmósfera, y la explotación de canteras para la obtención de áridos y materias primas necesarias para la producción de los hormigones. Todo lo anterior demanda la búsqueda de alternativas que resulten más económicas y sustentables (Miller et al., 2018).

Aunque las estructuras de hormigón no pueden ser desmontadas para ser reutilizadas, si pueden ser demolidas y recicladas. La forma más general del reciclaje de hormigón está relacionada con la gestión y tratamiento de los áridos; debido a su empleo en la construcción que abarca desde la creación de hormigón prefabricado, el empleo en morteros, aglomerantes asfálticos, hasta la construcción de carreteras y vías férreas. Según estudios el 20% de los áridos naturales usados actualmente podrían técnicamente ser reemplazados por áridos reciclados productos de desechos y residuos de construcción (Gebremichael et al., 2019).

El presente trabajo tiene como objetivo una revisión de tipo descriptivo sobre los factores que determinan el criterio de durabilidad en hormigones fabricados con residuos de la construcción y demolición por clasificación de sólidos.

## Materiales y métodos



Esta obra está bajo una licencia *Creative Commons* de tipo **Atribución 4.0 Internacional** (CC BY 4.0)

La actual investigación hace uso de las siguientes fuentes de información: artículos científicos en revistas indexadas, trabajos de grado publicados en repositorios académicos nacionales e internacionales; y manuales y libros electrónicos.

Mediante un enfoque mixto que complementa el método deductivo con el método bibliográfico mediante el manejo de una amplia fuente de bibliografía, se profundizar en las tecnologías existentes en el proceso de reciclaje de hormigones y los principales factores que pueden afectar la durabilidad en los elementos elaborados con hormigones reciclados.

## **Clasificación de residuos de la construcción y la demolición**

Los residuos de la construcción y las demoliciones, como su nombre indica, provienen obras de construcción, demolición y restauración de edificios e infraestructuras civiles. Estos pueden clasificarse según su peligrosidad en: inertes, no representan un peligro ni experimentan transformaciones físico-químicas que conduzcan a ello; especiales, aquellos que representan peligro para la salud y el medioambiente, generando un impacto negativo, normalmente los residuos de la construcción en esta clasificación están relacionados a infraestructuras industriales que impliquen esa peligrosidad, como radioactividad y reactividad química implícita; y banales, aquellos que por volumen y composición se asemejan a los residuos domésticos (Abarca, 2017; Silgado et al., 2018)

El único tipo de árido reciclado que puede ser admisible para hormigón estructural es el “árido reciclado de hormigón”, facilitando una mayor resistencia de la nueva interface que se creará entre la nueva pasta de cemento y los áridos reciclados, esto siempre que se impongan valores límites para las impurezas, reduciéndose los efectos negativos sobre la resistencia y durabilidad (Abreu, 2018).

El proceso de obtención de los áridos reciclados de hormigones normalmente implica estos tres tipos de tratamientos: el pre-tratamiento, que tiene por objeto mejorar la manejabilidad disminuyendo el volumen de aquellos elementos de grandes dimensiones antes de entrar en el proceso de reciclado. Para ello se utiliza un demoledor, o un martillo vibrante, siendo eficaz en la retirada de las barras de acero corrugado del hormigón; seguido el tratamiento primario, el cual consiste en un pre-cribado mediante una trituración, casi siempre empleando una machacadora de mandíbulas cuyo producto es cribado, eliminándose un material de rechazo constituido por tierras y partículas finas (Lauritzeny Hahn, 2016).

Finalmente un tratamiento secundario, el cual consta de dos etapas: tiraje, donde se depuran elementos ajenos al hormigón y molida, por medio de molino de impacto para obtener un árido reciclado con granulometría continua y número de caras adecuadas. Después del molino de impacto, es necesario disponer un segundo electroimán para



eliminar el acero liberado en el fraccionamiento. Finalmente se dispone de una criba con uno o varios tamices donde los residuos son separados en medidas que van desde arena hasta grava gruesa (Gámez-García et al., 2017).

En este sentido, los áridos reciclados procedentes de hormigón presentan cierta heterogeneidad en sus propiedades, debido principalmente a las distintas características de los hormigones que llegan a la planta de reciclado, a los sistemas de trituración empleados y a la presencia de impurezas. La forma de los áridos reciclados está determinada en gran medida por el equipo de machaqueo. Los molinos de impactos proporcionan forma cúbica al árido, pero la experiencia ha demostrado que el hormigón tiende a romper en bloques pequeños, generando partículas planas y alargadas (Gómez, 2013).

En general, la calidad del árido reciclado está claramente influida por la fracción utilizada, no siendo deseable el uso de fracciones finas (disminuyen la densidad, aumentan la absorción, presentan impurezas como partículas ligeras y terrones de arcilla, así como un mayor contenido de cloruros y de sulfatos) (Sandoval et al., 2014).

## **Criterio de durabilidad de hormigones fabricados con residuos de la construcción y demolición por clasificación de sólidos**

La durabilidad del hormigón comprende su comportamiento y el de los elementos metálicos en su interior frente a acciones mecánicas, ambientales y químicas. De esta forma al momento diseñar una mezcla de hormigón debe analizarse el tipo de ambiente circundante, validándose que sea resistente a los efectos químicos agresivos que puedan inducir una posterior corrosión. Esta complejidad multicriteria la ha condicionado que incluso hoy, la durabilidad de los hormigones reciclado es un campo poco estudiado y los resultados que se presentan resultan dispersos.

(Bañón y Varona, 2012; Beltrán, 2017).

Los principales factores que determinan la durabilidad en un hormigón son la porosidad, la permeabilidad, la capacidad de absorción, la resistividad eléctrica, la carbonatación, entre otros. De ellos la porosidad y la permeabilidad se consideran condicionantes sobre los demás. (Serna et al., 2018)

Respecto a la porosidad en el hormigón (áridos, cemento hidratado en forma de pasta y aire), esta tiene en cuenta los vacíos presentes, que pueden llegar a representar entre el 8 % - 25 % del volumen total, incidiendo directamente en la capacidad de transferencia de materia, dependiendo de la distribución del tamaño de los poros, así como de su conectividad (Juela et al., 2018).

En su relación con las propiedades mecánicas, la variación de la porosidad capilar de la pasta afecta directamente la resistencia mecánica y el coeficiente de permeabilidad al agua. A medida que la porosidad se reduce, la resistencia se



incrementa, como consecuencia del incremento a nivel microscópico de las fuerzas de unión, debido esto a la disminución en el tamaño y conectividad de los poros (Villagrán et al., 2019).

La durabilidad en los elementos elaborados con hormigones reciclados, se ve afectada en dependencia del porcentaje de sustitución de los áridos, la relación agua/cemento y de la cantidad de mortero adherido en los áridos; incrementando factores como la porosidad, haciendo más vulnerables las mezclas (Cabrera et al., 2017).

El otro factor determinante es la permeabilidad, que se refiere a la cantidad de migración de agua u otras sustancias líquidas por los poros del material en un determinado tiempo, condicionando durante el proceso de fraguado la composición de la porosidad; durante la hidratación de la pasta, el calor de hidratación y evaporación del agua de mezcla; desde el punto de vista energético, los perfiles térmicos del hormigón, así como la formación de cavidades y grietas debido a la contracción plástica en el concreto en su enfriamiento (Jiang y Cheng, 2020). De los dos factores, la mayoría de los procesos de degradación del hormigón dependen más de la permeabilidad, siendo el coeficiente de permeabilidad la característica difusiva del material (Kapoor et al., 2019).

La incorporación del árido reciclado en el hormigón representa un aumento de varios factores que afectan la durabilidad entre estos la permeabilidad, aunque el resultado final depende también de las características de la nueva matriz cementante.

Beltrán (2017) señala que la sustitución del 20% del árido natural, por áridos reciclados, produce afectaciones despreciables, desde el punto de vista estructural de los hormigones producidos con estas dosificaciones, sin embargo, la resistencia va disminuyendo a medida que se incrementa el porcentaje de sustitución. Se aprecian afectaciones considerables en hormigones donde son sustituidos al 100% los áridos naturales por los reciclados.

## **Ventajas y desventajas reportadas del uso de hormigones reciclados**

Varios autores (Kulakowsky et al., 2012; Xia et al., 2020) han documentado las ventajas de la reutilización del hormigón reciclado, señalando que minimiza los residuos no tratados que solían acumularse, incluso puede ser utilizado en áreas cercanas a la demolición, fomentando la disminución de los costos de transporte de áridos y el efecto ambiental de la actividad extractiva. Además, el costo de enviar residuos a los sitios de disposición final muchas veces puede ser superior al costo de procesamiento de los residuos para su reutilización por un reciclador local.

Por otro lado la reutilización demanda un estudio de caracterización del árido reciclado elaborado en el proceso de trituración. Deben considerarse además la existencia de una alta generación de polvo, ruidos y vibraciones producidas en las operaciones de tamizado y machaqueo, los cuales tendrán impactos directos sobre la salud humana y el medio



ambiente. Finalmente, el hormigón resultante con árido recuperado experimentará variación en las propiedades producto de las características de los áridos reciclados empleados, razón por la cual su uso debe estar precedido a estudios de comportamiento estructural que lo avale (Han et al., 2018; Han et al., 2019).

## Resultados y discusión

El gran volumen de publicaciones e investigaciones internacionales evidencia que el tema tratado tiene una alta relevancia tecnológica. En el contexto de Ecuador, el tratamiento de la temática recién empieza a ser abordado a niveles de tesis de grado y se indexan escasos trabajos científicos, no obstante las experiencias internacionales publicadas sirven de guía para la implementación de buenas prácticas y requerimientos tecnológicos óptimos para el aprovechamiento de hormigones mediante su reciclaje y reutilización.

Respecto a los áridos reciclados procedentes de hormigones demolidos, se evidencia una heterogeneidad en sus propiedades constitutivas asociada a la naturaleza misma del proceso de reciclaje del hormigón, donde llegan residuos de diferentes obras, con diferentes características constitutivas. Incluso sobre esa heterogeneidad de origen actúa el sistema de trituración empleado y la capacidad de separación de impurezas del sistema de clasificación.

De una serie de factores que inciden sobre la durabilidad (porosidad, permeabilidad, capacidad de absorción, resistividad eléctrica, carbonatación, entre otros), se deben considerar principales la porosidad y la permeabilidad, pues estas condiciones a su vez los restantes, al facilitar a su vez el proceso de interacción del medio externo con el interior del hormigón, proceso siempre negativo si se parte de la base teórica de que el hormigón óptimo es impermeable. En la práctica la porosidad puede llegar a representar entre el 8 - 25 % del volumen total, lo cual implica en el margen alto una gran difusividad de intersticios y vías de penetración de medio externo. Por otro lado, la permeabilidad es sin duda el factor decisivo en la reducción del acceso de agentes agresivos dentro del hormigón condicionando los otros factores y por ende la durabilidad.

En síntesis, tanto la permeabilidad como la porosidad pueden ser limitadas por un meticuloso tratamiento de los residuos del hormigón reciclado al lograrse una alta depuración de fracciones no útiles, es decir, la tecnológica de reciclado es decisiva en la durabilidad de los hormigones con áridos reciclados.

## Conclusiones

La recuperación y reciclado de hormigones es parte imprescindible para conseguir y compatibilizar el desarrollo constructivo-económico de la sociedad con la preservación del medio ambiente. Está sobre todo enfoque tiene una



Esta obra está bajo una licencia *Creative Commons* de tipo **Atribución 4.0 Internacional** (CC BY 4.0)

naturaleza comercial, orientada a buscar beneficios técnico-económicos viables; y estos solo pueden fundamentarse teniendo en cuenta la situación y las condiciones locales como la cercanía y cantidad de agregados naturales disponibles.

A través del reciclaje se obtienen nuevos áridos que pueden ser reutilizados en hormigón, rellenos de canteras, ladrillos, gravas para jardines, bases y sub-bases de pavimentos para carreteras entre otros usos. Aunque para hormigones solo el árido de hormigón reciclado debe ser empleado.

La durabilidad en los elementos elaborados con hormigones reciclados, se ve afectada en dependencia del porcentaje de sustitución de los áridos, la relación agua/cemento y la cantidad de mortero adherido en los áridos reciclado (calidad de la tecnología de tratamiento); incrementando factores como la porosidad. La sustitución del 20% del árido natural, por áridos reciclados, produce afectaciones despreciables, desde el punto de vista estructural. Un porcentaje superior compromete la resistencia.

## Conflictos de intereses

Los autores de la presente investigación declaran que no poseen conflictos de intereses.

## Contribución de los autores

Conceptualización: Francisco Emilio Cevallos Veliz, Byron Baque Campozano.

Curación de datos: Francisco Emilio Cevallos Veliz, Byron Baque Campozano.

Análisis formal: Francisco Emilio Cevallos Veliz, Byron Baque Campozano.

Investigación: Francisco Emilio Cevallos Veliz, Byron Baque Campozano.

Metodología: Francisco Emilio Cevallos Veliz, Erik Gabriel Villavicencio Cedeño.

Software: Francisco Emilio Cevallos Veliz, Byron Baque Campozano.

Validación: Byron Baque Campozano, Erik Gabriel Villavicencio Cedeño.

Visualización: Francisco Emilio Cevallos Veliz.

Redacción – borrador original: Francisco Emilio Cevallos Veliz, Byron Baque Campozano, Erik Gabriel Villavicencio Cedeño.

Redacción – revisión y edición: Francisco Emilio Cevallos Veliz, Byron Baque Campozano, Erik Gabriel Villavicencio Cedeño.



## Financiamiento

La investigación no requirió fuente de financiamiento externa, ha sido financiada por los autores.

## Referencias

- Abarca-Guerrero, L. (2017). Nivel de importancia de las causas de generación de residuos en la construcción en Costa Rica. *Revista Tecnología en Marcha*, 30(4), 130-137.
- Abreu Báez, E. M. (2018). Evaluación de la durabilidad de especímenes de hormigón con áridos reciclados encapsulados. Carbonatación y Porosidad (Doctoral dissertation, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas. Facultad de Construcciones. Departamento de Ingeniería Civil.).
- Bañón, L., & Varona Moya, F. D. B. (2012). Hormigón Armado y Pretensado. Presentaciones (curso 2011-2012). Estructuras de Hormigón Armado y Pretensado.
- Beltrán Alverdi, B. (2017). Estudio de la durabilidad del hormigón elaborado con áridos reciclados encapsulados (Doctoral dissertation, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas. Facultad de Construcciones. Departamento de Ingeniería Civil.).
- Cabrera-Covarrubias, F. G., Gómez-Soberón, J. M., Almaral-Sánchez, J. L., Arredondo-Rea, S. P., Gómez-Soberón, M. C., & Mendivil-Escalante, J. M. (2017). Propiedades en estado fresco de morteros con árido reciclado de hormigón y efecto de la relación c/a. *Ingeniería y Desarrollo*, 35(1), 198-218.
- Han, A. L., Setiawan, H., & Hajek, P. (2019, June). Laboratory Concrete Specimens Waste, a Case Study on Life Cycle Assessment. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 290, No. 1, p. 012015). IOP Publishing.
- Han, D., Yang, Y., Ying, C., Sierens, Z., Fan, H., & Li, J. (2018). Efficient recycling and reuse of waste concrete on a construction site. *AcıSpecialPublications*, 38-1.
- Gámez-García, D. C., Saldaña-Márquez, H., Gómez-Soberón, J. M., & Corral-Higuera, R. (2017). Estudio de factibilidad y caracterización de áridos para hormigón estructural. *Ingeniería y Desarrollo*, 35(2), 283-304.
- Gebremichael, N. N., Karein, S. M. M., Karakouzian, M., & Jadidi, K. (2019). Investigation of setting time and compressive strength of ready-mixed concrete blended with returned fresh concrete. *Construction and Building Materials*, 197, 428-435.
- Gómez, L. M. T. (2013). Propiedades Mecánicas de los Agregados Ante Variaciones Climáticas: Reporte de caso en Bucaramanga. *Prospectiva*, 11(1), 31-39.





- Jiang, C., & Cheng, X. (2020). Recycling of waste ceramic foams as fine aggregates in pervious concrete. *RSC Advances*, 10(4), 2364-2367.
- Juela, D., Bermeo, J., & Alvarez, D. (2020). Resistencia a la compresión y resistividad eléctrica de hormigones elaborados con materiales cementicios suplementarios y agregados reciclados. *Revista Ingeniería De Obras Civiles*, 10(1), 32-44.
- Kapoor, K., Dar, F. A., & Rather, D. A. (2019). Properties of Permeable Concrete Made by Recycled Aggregates. In *Sustainable Engineering* (pp. 359-365). Springer, Singapore.
- Kulakowski, M., Guerreiro, M., & González, M. (2012). Viabilidad de utilización de aditivo estabilizador de hidratación (AEH) para el reciclaje del hormigón en estado fresco: Estudio de caso en el sur de Brasil. *Revista de la Construcción*, 11(3), 99-111.
- Lauritzen, E. K., & Hahn, N. J. (2016). Producción de residuos de construcción y reciclaje. *Boletín CF+ S*, (2).
- Miller, S. A., Horvath, A., & Monteiro, P. J. (2018). Impacts of booming concrete production on water resources worldwide. *Nature Sustainability*, 1(1), 69-76.
- Sandoval, C. H. H., Aranda-López, J. E., & Prieto-Hernández, J. A. (2014). Caracterización de mezclas semidensas con agregados de la región de Tunja. *Revista Facultad de Ingeniería*, 23(36), 39-51.
- Serna Ros, P., Martí Vargas, J. R., & Llano Torre, A. (2018, March). HAC 2018. V congreso iberoamericano de hormigón autocompactante y hormigones especiales. In *Colección Congreso*. Editorial Universitat Politècnica de València.
- Silgado, S. S. S., Molina, J. D. A., Mahecha, L., & Calderón, L. (2018). Diagnóstico y propuestas para la gestión de los residuos de construcción y demolición en la ciudad de Ibagué (Colombia). *Gestión y Ambiente*, 21(1), 9-21.
- Villagrán-Zaccardi, Y. A., Pico-Cortés, C. M., & Zega, C. J. (2019, September). Incidencia del Árido Reciclado sobre la Durabilidad del Hormigón Armado frente a la Corrosión. In *Congreso CONPAT 2019*, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.
- Xia, B., Ding, T., & Xiao, J. (2020). Life cycle assessment of concrete structures with reuse and recycling strategies: A novel framework and case study. *Waste Management*, 105, 268-278.

