

Tipo de artículo: Artículo original

Simulación computacional de prueba de resistencia para el hormigón endurecido

Computer simulation of strength test for hardened concrete

Juan Jordan Tubay López^{1*} , <https://orcid.org/0000-0002-3700-5580>

Byron Baque Campozaño² , <https://orcid.org/0000-0001-9701-2179>

Adrian Óscar Macías Loor³ , <https://orcid.org/0000-0002-2560-3946>

¹ Facultad de Ciencias Técnicas, Universidad Estatal del Sur de Manabí, UNESUM, Jipijapa, Manabí, Ecuador.

² Facultad de Ciencias Técnicas, Universidad Estatal del Sur de Manabí, UNESUM, Jipijapa, Manabí, Ecuador.

³ Facultad de Ciencias Técnicas, Universidad Estatal del Sur de Manabí, UNESUM, Jipijapa, Manabí, Ecuador.

* Autor para correspondencia: tubay-juan2671@unesum.edu.ec

Resumen

El objetivo de la presente investigación es un estudio de revisión sobre la viabilidad técnica del uso de los agregados de hormigones reciclados en nuevos hormigones y los efectos sobre los diferentes criterios de resistencias que se realizan al hormigón endurecido, fundamentalmente: resistencia a compresión, flexión, tracción, fluencia y retracción al secado. Se implementó el método bibliográfico y el método deductivo en la elaboración de la revisión descriptiva del proceso de reciclaje de hormigones y los principales requisitos tecnológicos que se deben garantizar. Para diferentes criterios de resistencias se resaltan límites de sustitución de áridos finos y gruesos reportados en investigaciones recientes.

Palabras clave: hormigón reciclado; criterios de resistencia; áridos reciclados.

Abstract

The objective of this research is a review study on the technical feasibility of the use of recycled concrete aggregates in new concrete and the effects on the different resistance criteria that are carried out to hardened concrete, fundamentally: compressive strength, bending, traction, creep and shrinkage upon drying. The bibliographic method and the deductive method were implemented in the preparation of the descriptive review of the concrete recycling process and the main technological requirements that must be guaranteed. For different resistance criteria, substitution limits of fine and coarse aggregates reported in recent research are highlighted.

Keywords: recycled concrete; strength criteria; recycled aggregate.

Recibido: 03/12/2021

Aceptado: 22/01/2021

Introducción



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

El hormigón es un material con una alta durabilidad, razón por la cual se ha colocado como preferido en la industria de la construcción. Pero a la vez tiene una baja o nula mitigación como residuo, generando su acumulación una preocupación en la comunidad académica.

Además la huella ecológica de la industria del hormigón es irreversible, basta apreciar las cifras de consumo de combustibles fósiles, las emisiones de gases nocivos y la explotación extractiva de canteras para la obtención de áridos. Una de las variantes para reducir estos efectos es la reutilización de hormigones, es decir, lograr reciclarlos (Mah et al., 2017).

En (Xia, 2020) se señala la relevancia de la reutilización del hormigón, destacando que minimizaría la acumulación de residuos de demoliciones y fomentaría una industria de reciclaje impactando positivamente sobre los costos de producción y transporte de áridos, y a la vez disminuyendo la actividad extractiva.

Desde el punto de vista comercial la iniciativa es globalmente viable si se considera que el costo de enviar residuos a los sitios de disposición final puede ser superior al costo de procesamiento de los residuos in situ y la comercialización por un procesador local.

El objetivo de la presente investigación es un estudio de revisión sobre la viabilidad técnica del uso de los agregados de hormigones reciclados en nuevos hormigones y los efectos sobre los diferentes criterios de resistencias que se realizan al hormigón endurecido.

Materiales y métodos

Se realizó una búsqueda bibliográfica en buscadores académicos utilizando las palabras claves: “hormigón reciclado”, “criterios de resistencia”, “áridos reciclados”. La selección de materiales utilizados responde a su ajuste al objetivo y la conformidad con la temática.

Los métodos implementados fueron el método bibliográfico y el método deductivo, desde un punto de vista mixto, complementándose en la selección de bibliografía que informasen sobre hormigón reciclado, criterios de resistencia y áridos reciclados.

Viabilidad técnica del uso de los agregados de hormigones reciclados en nuevos hormigones

Los residuos constructivos son de una composición compleja y provienen de la construcción, la demolición o la restauración de edificios e infraestructuras civiles que terminaron su vida útil a criterio del usuario o precisan ser remodeladas (Abarca, 2017).



Algunos al no experimentar transformaciones físico-químicas con el medio de depósito final, permanecen inactivos por largos períodos de tiempo; no obstante su huella ambiental es significativa. Otros al representar peligro para la salud y el medioambiente, generan un impacto negativo y resulta complejo su manejo, deposición e incluso resulta inviable muchas veces su reutilización como pasa con los radiactivos (Silgado et al., 2018).

Dado el alto potencial para ser reutilizado, a motivado un creciente acercamiento académico y el desarrollo de tecnologías de procesamiento, fundamentándose por varias autores (Lauritzeny Hahn, 2016), la viabilidad técnica del uso de los agregados de hormigones reciclados en nuevos hormigones.

La obtención de los áridos reciclados de hormigones involucra una cadena de procesos: el acondicionamiento inicial, donde se fraccionan valiéndose de un demolidor o un martillo vibrante los elementos de grandes dimensiones a volúmenes manejables por el equipamiento industrial, en el mismo se retiran los aceros implícitos mediante trampas magnéticas y rastrillado. Seguido un proceso de triturado-cribado, mediante un triturador de mandíbulas y una criba, descartándose material de rechazo (mortero adherido constituido por tierras y partículas finas). Luego, un proceso de tiraje y molido, lográndose una depuración del árido reciclado con granulometría continua y número de caras adecuadas. Finalmente, una criba permite mediante varios tamices clasificar los áridos reciclados desde arena (sustituto fino) hasta grava (sustituto grueso) (Gámez-García et al., 2017).

Aunque los áridos reciclados reportan viabilidad técnica para infinitud de fines, en único árido reciclado viable para ser usado en hormigones estructurales es el “árido reciclado de hormigón” (Sema et al., 2018).

Pruebas de resistencias para el hormigón con áridos reciclados endurecido.

Uno de los aspectos que deben tenerse en cuenta cuando se busca emplear áridos de hormigones reciclados son los valores de la densidad, pues una menor densidad del árido reciclado hace que la densidad del hormigón ya endurecido sea por debajo de los valores para hormigones convencionales. Autores reportan (de Juan, 2004; Gámez et al., 2017) valores de reducción de la densidad entre un 4-15 % sobre la densidad del hormigón con árido natural para hormigones con sustitución total de árido grueso reciclado, siendo el porcentaje de sustitución del árido natural por el árido reciclado el factor más influyente en la densidad del hormigón reciclado.

Los horminos deben ser sometidos a ensayos múltiples de resistencia. Estas prueba emulan como se comportaría ante eventos tanto estáticos como dinámicos que puedan presentarse en su vida útil. Respecto a la solicitud a compresión, la evolución de hormigones con áridos reciclados no es muy distante durante las primeas semanas a la de los hormigones con áridos naturales. Tras este período, se registra una disminución siempre que se mantenga la misma relación a/c. Esta disminución se acrecienta en la medida que aumenta el árido grueso sustituido (Guo et al., 2018).



Un análisis de este comportamiento señala que múltiples factores inciden en la resistencia a la compresión: determinante es la cantidad de mortero adherido a la matriz de árido reciclado, potenciando la existencia de zonas frágiles entre el árido reciclado y el mortero adherido en el hormigón endurecido; otro es el aire ocluido; por último la cantidad de agua total en la mezcla, influyendo en la resistencia, ya que los áridos reciclados tiene una capacidad de absorción alterando la relación a/c (Deng et al., 2019).

Arena (2012) señala que al sustituirse únicamente el árido grueso, las pérdidas de resistencia son despreciables, siempre que el porcentaje no supere 30%. En cambio, Thomas et al. (2003) reporta que tras 28 días de curado, los hormigones con sustitución de un 20 % de árido reciclado no presentan cambios significativos con respecto a la resistencia a compresión respecto a una muestra patrón con árido pétreo.

Para una sustitución de un 50 % de árido reciclado grueso, según Arena (2012), la resistencia a compresión muestra rangos entre una ganancia de 5 % y una pérdida de 16 %. Cuando la sustitución del árido grueso es total las pérdidas oscilan entre el 1- 23 %. En cambio cuando se sustituyen el árido grueso y el árido fino íntegramente las pérdidas de resistencia se agudizan entre 6 - 30 %. Siempre que se desee asegurar niveles similares de resistencia, se debe reducir la relación a/c en 0,05 cuando se pretende una sustitución total; esto implica considerar el aumento de la capacidad de absorción con áridos reciclado, conduciendo incluso a mayor consumo de cemento.

Otro parámetro de relevancia es el módulo de elasticidad, donde debe considerarse que cada material componente tiene uno propio, lo que hace entendible que módulo de elasticidad de la pasta que envuelve los áridos reciclados sea inferior al del árido y al del hormigón endurecido. Razón por la cual, los áridos reciclados tienen un módulo de elasticidad inferior al de los áridos naturales, condicionando que el módulo de elasticidad del hormigón reciclado sea inferior al del hormigón convencional (Li, 2008).

En términos cuantificables, en hormigones con menos de un 30 % de sustitución del árido grueso el módulo de elasticidad experimenta una disminución entre el 4 - 10 %; entre el 30 - 50 % de sustitución del árido grueso la reducción que experimenta el módulo de elasticidad puede llegar al 20 %; ante una sustitución total del árido grueso la reducción alcanza valores hasta del 50 %. Incluso, al sustituir además el árido fino dichas reducciones han llegado hasta el 80 % (Li y Zhang, 2017).

En cuanto a los valores de resistencia a tracción para hormigones con áridos reciclados este tiene tendencia a ser similares a los de áridos naturales, con pérdidas muy pequeñas, incluso para una sustitución de 50%, tanto de árido reciclado grueso o árido fino. Arena (2012) documenta que cuando la sustitución es total, los valores van entre 6 - 32 % para grueso y hasta 30% para fino. La reducción es debida a una mayor textura superficial (rugosidad aumentada) de los áridos reciclados y a existencia de micro fisuras en el mortero adherido.



En cuanto a la resistencia a cortante, en los hormigones con áridos reciclados se reporta una disminución de 26 % ante la sustitución únicamente el árido grueso; cuando la sustitución implica el árido fino, además, la disminución llega ser hasta de 41 % (Ponce et al., 2020)

Aunque los parámetros anteriores son indicativos de referencia de la capacidad estructural del hormigón con áridos reciclados, el comportamiento a flexión (que tiene implícita solicitud parcial a tracción) suele ser proporcional a la resistencia a compresión. En un orden de sustitución del árido grueso inferior al 50 % las reducciones resultantes son pequeñas, no siendo así en el caso de una sustitución total del árido grueso natural por árido grueso reciclado. Si realizamos una sustitución total del árido grueso y fino, la disminución se acentúa con valores entre 15 - 29 % (Rodríguez, 2011).

Un parámetro de gran importancia es la retracción al secado. Este cuantifica la disminución del volumen del hormigón con el tiempo, debido al cambio del contenido de humedad del hormigón y cambios físico-químicos internos. Muchas veces al reportarse un aumento, se asocia entre otras causas, a que el módulo de elasticidad del árido reciclado es inferior al del árido convencional debido mortero adherido. También debe tenerse en cuenta una mayor capacidad de absorción al usar áridos reciclados, que implicará una mayor cantidad de agua empleada en la dosificación para conseguir la misma consistencia (Bendimerad et al., 2020).

Otros autores (Fanara, 2020; Contraffato et al., 2018) en estudios de estructuras sometidas a altas cargas indagan sobre la fluencia, aspecto asociado a la deformación irrecuperable de las probetas donde solo existe un retorno elástico reversible, acumulándose deformación irreversible. Este fenómeno ha sido estudiado por varios autores porque en el mismo puede producirse un alargamiento por encima de la zona del límite elástico sin una variación significativa de la tensión aplicada.

En el caso de hormigones con árido reciclado, con la incorporación del mortero adherido los valores experimentados a fluencia son superiores que en hormigones convencionales. De igual manera el comportamiento es proporcional, dado que en la medida que aumenta el porcentaje de árido sustituido mayor es la fluencia. Cuando la sustitución del árido grueso no es superior del 50 % la variación no supera el 22 %. En sustituciones totales de árido grueso oscilan entre 30 - 65 % (Parri et al., 2019).

Resultados y discusión

La recomendación de que solo el uso de áridos reciclados proveniente de hormigones debería ser usado para la formulación de hormigones, siempre y cuando estos sean procesados cuidadosamente, obedece a que la compatibilidad facilita el comportamiento eficiente desde el punto de vista estructural.



Una observación detallada de todos los límites de porcentajes viables a sustituir de árido fino y grueso en relación con los efectos sobre el comportamiento (a compresión, flexión, tracción y retracción al secado) del hormigón destaca la variabilidad de los resultados. Puede explicarse esta diversidad de rangos y efectos debido a las diferencias entre los áridos reciclados en cada una de las investigaciones reportadas. Motivos por los cuales resulta de buena práctica para estructuras con requerimiento realizar siempre comprobaciones a los hormigones que se formulan con áridos reciclados previa clasificación del origen de los mismos.

Aunque la revisión abarca varias experiencias internacionales, en Ecuador las potencialidades de reutilización de residuos de demoliciones y más específicamente de hormigones como áridos reciclados para hormigones es una alternativa en desarrollo que va ganando espacio y es visible en tesis de grado académica y empieza a ser frecuente en publicaciones técnicas-comerciales. Lo último es muy relevante porque el reciclado y reutilización no solo es un proceso que precisa una viabilidad técnica, sino que ocurre y se desarrolla siempre bajo una factibilidad económica y en este sentido se aprecia una tendencia creciente a valorar las oportunidades en el sector constructivo.

Conclusiones

La recuperación y reciclado de hormigones incide favorablemente en la disminución de la huella extractiva que dejan los áridos de origen natural y a la vez en el mecanismo logístico tanto de transporte como de deposición de residuos de demolición, reciclándose los últimos, contribuyéndose así la preservación del medio ambiente.

Aunque proceso de reciclaje facilita la obtención de áridos con ciertas texturas, granulometría y propiedades físico-química diferentes de un árido de origen natural, no todos los áridos reciclados presentan las mismas propiedades, por esta razón se recomienda emplear para hormigones solo el árido de hormigón reciclado.

Las propiedades mecánicas de los hormigones endurecidos con un porcentaje de sustitución con árido de hormigones reciclados, se ve afectada en dependencia del porcentaje de sustitución, la relación a/c y la cantidad de mortero adherido en los áridos reciclado (calidad de la tecnología de tratamiento); por lo que se recomienda un meticuloso procesamiento de los residuos buscando una depuración de fracciones no útiles y estudios de caracterización del árido reciclado elaborado en el proceso de trituración.

Conflictos de intereses

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



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

Contribución de los autores

Conceptualización: Juan Jordan Tubay López, Byron Baque Campozano, Adrian Óscar Macías Loor.

Curación de datos: Juan Jordan Tubay López, Byron Baque Campozano.

Análisis formal: Juan Jordan Tubay López, Byron Baque Campozano.

Investigación: Juan Jordan Tubay López, Byron Baque Campozano.

Metodología: Juan Jordan Tubay López, Adrian Óscar Macías Loor.

Administración del proyecto: Byron Baque Campozano.

Recursos: Byron Baque Campozano.

Software: Juan Jordan Tubay López.

Supervisión: Byron Baque Campozano, Adrian Óscar Macías Loor.

Validación: Juan Jordan Tubay López, , Adrian Óscar Macías Loor.

Visualización: Juan Jordan Tubay López, Byron Baque Campozano.

Redacción – borrador original: Juan Jordan Tubay López, Byron Baque Campozano, Adrian Óscar Macías Loor.

Redacción – revisión y edición: Juan Jordan Tubay López, Byron Baque Campozano, Adrian Óscar Macías Loor.

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.
- Arenas, M. D. C. (2012). *Materiales sostenibles en la edificación: residuos de construcción y demolición, hormigón reciclado* (Doctoral dissertation).
- Bendimerad, A. Z., Delsaute, B., Rozière, E., Staquet, S., & Loukili, A. (2020). Advanced techniques for the study of shrinkage-induced cracking of concrete with recycled aggregates at early age. *Construction and Building Materials*, 233, 117340.
- de Juan, M. S. (2004). *Estudio sobre la utilización de árido reciclado para la fabricación de Hormigón Estructural* (Doctoral dissertation, Universidad Politécnica de Madrid).



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

- Deng, Z., Sheng, J., & Wang, Y. (2019). Strength and constitutive model of recycled concrete under biaxial compression. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 23(2), 699-710.
- 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.
- Guo, Z., Tu, A., Chen, C., & Lehman, D. E. (2018). Mechanical properties, durability, and life-cycle assessment of concrete building blocks incorporating recycled concrete aggregates. *Journal of Cleaner Production*, 199, 136-149.
- Lauritzen, E. K., & Hahn, N. J. (2016). Producción de residuos de construcción y reciclaje. *Boletín CF+ S*, (2).
- Li, X. (2008). Recycling and reuse of waste concrete in China: Part I. Material behaviour of recycled aggregate concrete. *Resources, Conservation and Recycling*, 53(1-2), 36-44.
- Li, Q., & Zhang, C. (2017). A statistical study on the compressive strength of recycled aggregate concrete. *Chemical Engineering Transactions*, 59, 421-426.
- Mah, C. M., Fujiwara, T., & Ho, C. S. (2017). Concrete waste management decision analysis based on life cycle assessment. *Chemical Engineering Transactions*, 56, 25-30.
- Pani, L., Francesconi, L., Rombi, J., Naitza, S., Balletto, G., & Mei, G. (2019). Recycled Aggregates, Mechanical Properties and Environmental Sustainability. In *INPUT aCAcademy 2019* (pp. 431-442). FedOAPress-Federico II Open ACCESS University Press.
- Ponce, A. N. B., Macías, J. C. Z., Macías, J. A. M., Párraga, W. E. R., & de Calderero, R. A. P. (2020). Análisis de la prestación mecánica del hormigón empleando virutas de acero como agregado fino. *Revista de Investigaciones en Energía, Medio Ambiente y Tecnología: RIEMAT* ISSN: 2588-0721, 5(1), 15-22.
- Rodríguez, A. S. (2011). Análisis de la aplicabilidad de los áridos reciclados mixtos en hormigones. *UNE*, 7(58), 5-10.
- 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.



- Thomas, C., Cimentada, A., Polanco, J. A., Setién, J., Méndez, D., & Rico, J. (2013). Influence of recycled aggregates containing sulphur on properties of recycled aggregate mortar and concrete. *Composites Part B: Engineering*, 45(1), 474-485.
- 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



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