

Tipo de artículo: Artículo original

Simulación computacional de la permeabilidad de hormigones fabricados con agregados reciclados

Computational simulation of the permeability of concretes made with recycled aggregates

Jefferson Manuel Mendoza Macías^{1*} , <https://orcid.org/0000-0002-6646-417X>

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

Luis Alfredo Gutiérrez Sánchez³ , <https://orcid.org/0000-0003-4200-7449>

¹ Carrera de Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias Técnicas, Universidad Estatal del Sur de Manabí, UNESUM, Jipijapa, Manabí, Ecuador. mendoza-jefferson8782@unesum.edu.ec

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

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

* Autor para correspondencia: mendoza-jefferson8782@unesum.edu.ec

Resumen

El presente trabajo es un estudio de revisión sobre los mecanismos difusivos que permiten la permeabilidad de los agentes agresivos en hormigones fabricados con agregados reciclados y el efecto de la misma. Mediante un enfoque metodológico mixto, combinando el método bibliográfico y el método deductivo se seleccionaron aquellos documentos que informasen sobre la relación entre la permeabilidad y las reacciones álcali-sílice al interior del hormigón. También se precisan los efectos sobre las propiedades mecánicas y la durabilidad mediante la incidencia en la permeabilidad del uso de áridos reciclados en la formulación de hormigones. Se destaca que, aunque la reutilización de áridos reciclados es una tendencia aceptada por su positivo impacto ambiental y económico es necesario tener un conocimiento más profundo de las potencialidades y limitaciones antes de ser incorporados a las mezclas, evitando que comprometan la durabilidad de la estructura a largo plazo.

Palabras clave: permeabilidad; hormigones reciclados; agentes agresivos.

Abstract

The present work is a review study on the diffusive mechanisms that allow the permeability of aggressive agents in concretes made with recycled aggregates and its effect. Using a mixed methodological approach, combining the bibliographic method and the deductive method, those documents that reported on the relationship between permeability and alkali-silica reactions inside concrete were selected. The effects on mechanical properties and durability are also specified through the impact on the permeability of the use of recycled aggregates in the formulation of concrete. It is highlighted that although the reuse of recycled aggregates is an accepted trend due to its positive environmental and economic impact, it is necessary to have a deeper knowledge of the potentialities and limitations before being incorporated into the mixtures, avoiding that they compromise the long-term durability of the structure.

Keywords: permeability; recycled concrete; aggressive agents.



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

Recibido: 28/10/2021
Aceptado: 22/12/2020

Introducción

Históricamente, el hormigón se ha posicionado por ser capaz de garantizar apropiadas características tanto tecnológicas como resistencias mecánicas, estructuras que soportan eficientemente las cargas de servicio para advertidas en su diseño. No obstante, se reportan en las mismas afectaciones relacionadas con su desempeño ante el medio ambiente circundante (). Esto ha motivado estudios específicos sobre los factores incidentes en deterioro del hormigón y mitigar su incidencia sobre estructuras ya construidas (Fu et al., 2020; Pourbehi y van Zijl, 2019).

Diversos autores han asociado el proceso de deterioro del hormigón con la acción de una combinación de agentes agresivos físico-químico fundamentalmente, aunque también mecánicos e incluso biológicos. Los agentes físicos comprenden aquellos asociados al medioambiente (congelación-deshielo, cargas ambientales no previstas, etc.). Entre los agentes químicos son más complejos siendo los fundamentales las reacciones por sulfatos, nitritos, ácidos, agua de mar y cloruros (Fernandes et al., 2017; Bonic et al., 2015).

El objetivo del presente trabajo es la realización de estudio de revisión de tipo descriptivo sobre la permeabilidad ante los agentes agresivos en hormigones con agregados reciclados.

Materiales y métodos

Para la localización de los documentos bibliográficos se utilizaron varias fuentes documentales. Se realizó una búsqueda bibliográfica utilizando los descriptores: permeabilidad, hormigones reciclados, agentes agresivos. Los registros referenciados en la bibliografía son el resultado de una selección según relevancia y pertinencia en la temática según el objetivo trazado.

Mediante un enfoque metodológico mixto, combinando el método bibliográfico y el método deductivo se seleccionaron aquellos documentos que informasen sobre la permeabilidad ante los agentes agresivos en hormigones con agregados reciclados.

Durabilidad ante agentes agresivos en hormigones.

Varios reportes fundamentan la incidencia directa de los agentes agresivos sobre la baja durabilidad en los hormigones. En todos los casos, ya sean estos externos o internos, el grado de deterioro dependerá principalmente de la calidad del hormigón (Guerra et al., 2019).



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

Al respecto, las causas internas son de gran relevancia producto que forman parte de los cambios físico-químicos que experimenta el hormigón en su curado: la reacción álcali-agregado, los cambios de volumen debidos a diferencias entre las propiedades térmicas del agregado y de la pasta de cemento y sobre todo la permeabilidad del concreto; este factor determina en gran medida la vulnerabilidad del concreto ante los agentes externos y por ello un concreto durable debe ser relativamente impermeable (Albear et al., 2019).

Hay dos importantes reacciones que pueden provocar la degradación del hormigón por efecto expansivos y a la vez contribuyen a la permeabilidad: las reacciones sulfáticas internas y las reacciones álcali-árido; estas últimas engloban tres tipos: las reacciones álcali-carbonato, las reacciones álcali-sílice y las reacciones álcali-silicato (Barreto et al., 2009).

En hormigones con árido de origen natural, pétreos, los efectos sobre las propiedades debido a las reacciones álcali-sílice inciden principalmente en la disminución de propiedades mecánicas, como la capacidad de flexión y tracción, la reducción del módulo de elasticidad y menor proporción la resistencia a compresión, razón por la que han tomado el lugar relevante en cuanto a efecto agresivo. Estas de forma estructural, causan aumento de volumen generando una fisuración superficial, incluso visible, facilitando la fácil agresión de agentes externos, potenciando la corrosión de los aceros internos (Campos et al., 2010).

Por otro lado, aunque los áridos reciclados se han usado en múltiples aplicaciones, cuando se requieren en aplicaciones exigentes, como hormigones estructurales, es necesario tener un conocimiento más profundo de las potencialidades y limitaciones antes de ser incorporados a las mezclas. Cuando se incorporan áridos reciclados en hormigones deben evaluarse cuidadosamente los efectos sobre las características principales, incluso sobre los métodos convencionales de evaluación de las reacciones álcali-sílice (Acosta, 2012).

Aspectos como la granulometría, determinado por la tecnológica de procesamiento de los residuos constructivos, así como el origen y constitución de los desechos procesados, determina las formas y texturas del árido reciclado, influenciando directamente en la resistencia mecánica, la trabajabilidad y el consumo de cemento en los hormigones con áridos reciclados (Guerrero et al., 2018).

Diferentes autores han constatado que la presencia de mortero adherido es la principal causa de la disminución de la resistencia mecánica y que para hormigones no deben usarse residuos de hormigones con valores de resistencia a compresión inferiores a 25 MPa (Sabalsagaray et al., 2018).

La diferencia entre la resistencia a compresión entre el uso de reciclados y pétreo, aumenta con el aumento de la clase de resistencia del hormigón. Sin embargo, garantizando una curva granulométrica de los áridos implicados y la



trabajabilidad del hormigón fresco, la resistencia del hormigón con árido reciclado comparada con la del hormigón con árido pétreo viene presentando valores satisfactorios (Santosa y de Britob, 2018).

De la misma forma que la resistencia a la compresión, la densidad y el módulo de elasticidad también son relativamente más bajos en comparación con hormigones de árido natural. Además, para una relación w/c dada, la permeabilidad, la tasa de carbonatación y el riesgo de corrosión de la armadura aumenta (Liang et al., 2019).

La resistencia es un criterio necesario, pero no es el único que debe tenerse en cuenta para la validación del comportamiento de un hormigón. Son de importancia para la durabilidad del hormigón los líquidos y gases que lo penetran, siendo los más comunes el agua, los iones agresivos o puros, el oxígeno y el dióxido de carbono. La durabilidad del hormigón depende en gran medida de la facilidad con que estos entren y se propaguen a través del hormigón. Aunque a la vista parezca monolítico, el hormigón es a nivel micro totalmente esponjoso y cuantificar esta característica se llama comúnmente permeabilidad del hormigón.

Permeabilidad ante los agentes agresivos de hormigones fabricados con agregados reciclados

Si se desea precisar sobre las propiedades más importantes asociadas al transporte de fluidos en el hormigón, estas son: la difusividad iónica, la porosidad y la permeabilidad.

La permeabilidad es la principal preocupación al comprometer de la durabilidad, generándose el surgimiento y agravamiento de fenómenos de deterioro como la carbonatación, el ataque por cloruros y el desarrollo de reacciones álcali-sílice, que agudizaría nuevamente la misma, y así cíclicamente la exposición al exterior se potenciaría aceleradamente (Kapoor et al., 2019).

La permeabilidad, como fenómeno químico-físico, está directamente asociada a la cantidad de migración de agua u otras disoluciones por los poros del material en un determinado tiempo, principalmente en el proceso de fraguado, donde están ocurriendo la hidratación de la pasta, el calor de hidratación y evaporación del agua de mezcla. También contribuyen desde el punto de vista energético a la existencia de perfiles térmicos, así como la formación de cavidades y grietas debido a la contracción plástica durante el enfriamiento (Jiang y Cheng, 2020).

La permeabilidad está estrechamente ligada a las reacciones álcali-sílice. Actualmente estas reacciones se describen en términos de dos modelos distintos: el modelo topo-químico y el modelo de disolución-precipitación. Para ambos modelos el coeficiente de permeabilidad se considera la característica difusiva del material.

En el modelo topo-químico la reacción se desarrolla solo en la superficie de los áridos reactivos, no existiendo un traslado de especies reactivas del árido para la solución (Esposito y Hendrick, 2019).



En el modelo de disolución-precipitación la reacción se desarrolla en forma de solución intersticial después del cambio al estado iónico de las diversas especies reactivas (Sousa, 2016).

Con independencia del modelo, la expansión del gel formado por el desarrollo de la reacción álcali-sílice provoca la degradación del hormigón a través de diversos efectos mecánicos tanto para el material como para la estructura. Normalmente, la degradación por este efecto del hormigón puede tardar algún tiempo en manifestarse. No obstante, la sospecha de su existencia se confirma con la aparición de fisuras, exudaciones, eflorescencias, descamaciones y expansión de la estructura. Cuando estos aspectos son visibles, puede concluirse que la impermeabilidad está comprometida y la durabilidad se ha acortado (Champiri et al., 2016)

Cuando se implementan adiciones de árido reciclado en el hormigón, se reporta un aumento de varios factores negativos que afectan la durabilidad entre estos la permeabilidad, por otro lado, el resultado puede ser también afectado positivamente por las características de la matriz cementante que se forme (Shin et al., 2017).

Resultados y discusión

Se aprecian reportes coincidentes por autores que señalan que la presencia de mortero adherido es la principal causa de la disminución de la resistencia mecánica y que para formular hormigones no deben usarse residuos de hormigones con valores de resistencia a compresión inferiores a las proyectadas. Además, es reglamentario siempre garantizar estudios de comportamiento cuando se requiere una responsabilidad estructural y se utilizan áridos reciclados.

En el orden micro, técnicamente, aunque no exista un método generalmente aceptado para caracterizar la morfología de los poros en el hormigón y a la vez relacionarla con la durabilidad, las investigaciones y las buenas prácticas indican que el coeficiente de permeabilidad del hormigón es una excelente medida de su resistencia al ingreso de medios agresivos en estado gaseoso o líquido y constituye un indicador de la durabilidad potencial de un hormigón.

En síntesis, la permeabilidad se evidencia como fenómeno determinante ligado a la dinámica de las reacciones álcali-sílice, las cuales aunque inciden principalmente en la disminución de propiedades mecánicas (capacidad de flexión y tracción, reducción del módulo de elasticidad, leve disminución de la resistencia a compresión), su mayor efecto negativo es la expansión volumétrica, generadora de fisuras en las estructuras, incluso visibles, que resultan vías de fácil acceso a agentes agresivos, sobre todo la corrosión del acero estructural.

Debe observarse que la implementación de sustituciones por árido reciclado en el hormigón tiende a afectar la durabilidad al incidir directamente por la naturaleza del mortero adherido en los áridos reciclados en el coeficiente de permeabilidad de la mezcla. Una vía para atenuar este efecto negativo es el ajuste de mezcla, específicamente la relación agua/cemento.



Conclusiones

Las propiedades más importantes asociadas al transporte de fluidos en el hormigón, estas son: la difusividad iónica, la porosidad y la permeabilidad.

Aunque la permeabilidad aumenta con la incorporación del árido reciclado en el hormigón afectándose la durabilidad, se control depende también de las características de la matriz cementante.

Aunque los áridos reciclados se han usado en múltiples aplicaciones, cuando se requieren en aplicaciones exigentes, como hormigones estructurales, es necesario tener un conocimiento más profundo de las potencialidades y limitaciones antes de ser incorporados a las mezclas.

En cualquier caso, este nuevo contexto técnico implica que el sector de la ingeniería civil, tanto la rama de la investigación y como la docencia, asimilen y mejoren los requerimientos teóricos-prácticos para el uso de estos materiales reciclados alternativos a través de recomendaciones de buenas prácticas, intercambio de experiencias exitosas o desarrollo de documentación técnica a nivel reglamentario.

Conflictos de intereses

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

Contribución de los autores

Conceptualización: Jefferson Manuel Mendoza Macías, Byron Baque Campozano, Luis Alfredo Gutiérrez Sánchez.

Curación de datos: Jefferson Manuel Mendoza Macías, Byron Baque Campozano.

Análisis formal: Jefferson Manuel Mendoza Macías, Byron Baque Campozano, Luis Alfredo Gutiérrez Sánchez.

Investigación: Jefferson Manuel Mendoza Macías, Byron Baque Campozano.

Metodología: Jefferson Manuel Mendoza Macías, Byron Baque Campozano.

Administración del proyecto: Byron Baque Campozano.

Supervisión: Byron Baque Campozano.

Validación: Jefferson Manuel Mendoza Macías, Luis Alfredo Gutiérrez Sánchez.

Visualización: Jefferson Manuel Mendoza Macías.



Redacción – borrador original: Jefferson Manuel Mendoza Macías, Byron Baque Campozano, Luis Alfredo Gutiérrez Sánchez.

Redacción – revisión y edición: Jefferson Manuel Mendoza Macías, Byron Baque Campozano, Luis Alfredo Gutiérrez Sánchez.

Financiamiento

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

Referencias

- Acosta Collell, I. (2012). Calibración y puesta en marcha de una nueva máquina de ensayo para hormigón afectado por la reacción álcali-árido (Bachelor's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya).
- Albear, J. J. H., Valdés, A. C., Águila, R. M., & Clemente, C. V. (2019). Requirimientos tecnológicos para construir estructuras de hormigón armado altamente resistentes al ambiente agresivo costero de Cuba. *Revista CENIC Ciencias Químicas*, 50(1), 010-021.
- Barreto Santos, M., de Brito, J., & Santos Silva, A. (2009). Métodos de evaluación de las reacciones álcali-sílice en hormigones con áridos reciclados. *Revista ingeniería de construcción*, 24(2), 141-152.
- Bonić, Z., Ćurčić, G. T., Davidović, N., & Savić, J. (2015). Damage of concrete and reinforcement of reinforced-concrete foundations caused by environmental effects. *Procedia engineering*, 117, 411-418.
- Campos, A., LOPEZ, C., & Aguado, A. (2010). Análisis meso-mecánico del hormigón bajo la acción de procesos expansivos internos. XXVII Encuentro del Grupo Español de Fractura/12ª Jornadas de Fractura de SPM. Porto, Portugal, 283-288.
- Champiri, M. D., Sajjadi, S., Mousavizadegan, S. H., & Moodi, F. (2016). Assessing distress cause and estimating evaluation index for marine concrete structures. *Am. J. Civ. Eng. Arch*, 4(4), 142-152.
- Esposito, R., & Hendriks, M. A. N. (2019). Literature review of modelling approaches for ASR in concrete: a new perspective. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 23(11), 1311-1331.
- Fernandes, B., Gil, A. M., Bolina, F. L., & Tutikian, B. F. (2017). Microstructure of concrete subjected to elevated temperatures: physico-chemical changes and analysis techniques. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, 10(4), 838-863.
- Fu, C., Ye, H., Jin, N., & Huang, Y. (2020). Chloride Penetration in Reinforced Concrete Beams under Combined Sustained Loading and Drying–Wetting Cycles. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 32(4), 04020025.



- Guerra, J. C., Alber, J. J. H., & Valdes, A. C. (2019). Importancia del estudio del desempeño por durabilidad del puente del rio Chone, provincia de Manabí, Ecuador. *Revista Cubana de Ingeniería*, 9(1), 57-66.
- Guerrero Vilches, I., Rodríguez Jerónimo, G., & Rodríguez Montero, J. (2018, March). Valorización como árido reciclado mixto de un residuo de construcción y demolición en la confección de hormigones autocompactantes durables en terrenos con yesos. In HAC 2018. V Congreso Iberoamericano de hormigón autocompactable y hormigones especiales (pp. 579-588). Editorial Universitat Politècnica de València.
- Jiang, C., & Cheng, X. (2020). Recycling of waste ceramic foams as fine aggregates in pervious concrete. *RSC Advances*, 10(4), 2364-2367
- Liang, C., Ma, H., Pan, Y., Ma, Z., Duan, Z., & He, Z. (2019). Chloride permeability and the caused steel corrosion in the concrete with carbonated recycled aggregate. *Construction and Building Materials*, 218, 506-518.
- 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.
- Pourbehi, M. S., & van Zijl, G. P. (2019). Analysis of combined action of seismic loads and alkali-silica reaction in concrete dams considering the key chemical-physical-mechanical factors and fluid-structure interaction. *Engineering Structures*, 195, 263-273.
- Sabalsagaray Curuchet, B., Boiani Casella, A., & Rodríguez de Sensale, G. (2018, March). Empleo de residuos de industria cementera y arrocera en micro-hormigón para paneles de viviendas de interés social en Uruguay. In HAC 2018. V Congreso Iberoamericano de hormigón autocompactable y hormigones especiales (pp. 301-310). Editorial Universitat Politècnica de València.
- Santosa, M. B., & de Brito, J. (2018). Susceptibilidade dos agregados reciclados no desenvolvimento da reação álcali-sílica: o que pode mudar?. *Revista de Engenharia*, (55), 36-46.
- Shin, K. J., Bae, W., Choi, S. W., Son, M. W., & Lee, K. M. (2017). Parameters influencing water permeability coefficient of cracked concrete specimens. *Construction and Building Materials*, 151, 907-915.
- Sousa, S. P. A. (2016). Análise do comportamento estrutural de barragens afetadas por expansões do betão. Aplicação à barragem de Fagilde (Doctoral disser

