

UCUENCA

Universidad de Cuenca

Facultad de Ingeniería

Carrera de Ingeniería Civil

“Beneficios Físico-Mecánicos y Análisis de Sostenibilidad de Hormigones Porosos Elaborados con Materiales Locales”


Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Civil

Autor:

David Federico Sánchez Arízaga

Director:

Daniel Estuardo Mogrovejo Carrasco

ORCID:  0000-0002-5797-1153

Cuenca, Ecuador

2023-09-27

Resumen

El uso y estudio de hormigones porosos está ampliamente desarrollado, de forma internacional, por los beneficios sostenibles que han demostrado; no obstante, son muy pocos los estudios que de forma local se han realizado sobre el tema. El presente trabajo indaga en los contrastes de la elaboración de hormigones permeables al utilizar dos tipos de áridos de la provincia del Azuay (árido canto rodado, árido triturado y una combinación de ambos); así, se caracteriza el agregado y se resaltan los beneficios de cada mezcla mediante el análisis del asentamiento, la resistencia a tracción indirecta, el porcentaje de vacíos interconectados, la permeabilidad y las emisiones de CO₂. Adicionalmente, se elaboraron mezclas patrón de hormigón convencional con cada tipo de árido para contrastar los beneficios y perjuicios de las muestras permeables. Con el fin de examinar netamente la influencia del árido en cada mezcla, se mantuvo la misma relación agua-cemento y porcentaje de aditivo. Para las mezclas permeables, se varió, únicamente, el porcentaje de pasta de cemento (cemento, agua y aditivo) y se excluyó el uso de árido fino. Tras el estudio el hormigón con las mejores prestaciones resultó ser aquel elaborado con árido grueso triturado. De igual forma se encontró que incluir una parte de árido grueso canto rodado puede ayudar a mejorar la resistencia sin disminuir en gran medida la permeabilidad, la trabajabilidad o afectar las emisiones producidas.

Palabras clave: hormigón permeable, árido triturado, canto rodado, sostenibilidad



El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Cuenca ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por la propiedad intelectual y los derechos de autor.

Repositorio Institucional: <https://dspace.ucuenca.edu.ec/>

Abstract

Internationally, the use and study of porous concretes have been widely developed due to the sustainable benefits they have shown to bring. However, there are very few local studies dedicated to this subject. This paper investigates the contrasts of producing permeable concrete using two types of aggregates from the province of Azuay: rounded river aggregate, crushed aggregate, and a combination of both. The study characterizes the aggregates and highlights the benefits of each mixture by analyzing slump, indirect tensile strength, percentage of interconnected voids, permeability, and CO₂ emissions. In addition, standard mixtures of conventional concrete were prepared using each type of aggregate to compare the advantages and disadvantages of the permeable samples. In order to thoroughly analyze the impact of the aggregate in each mixture, we maintained the same water-cement ratio and percentage of admixture. For the permeable mixes, only the percentage of cement paste (cement, water, and admixture) was varied, while the inclusion of fine aggregate was excluded. After the study, it was determined that the concrete with the best performance was the one made with coarse crushed aggregate. However, it was also found that incorporating a portion of coarse rounded river aggregate can enhance strength without significantly reducing permeability or slump, or impacting emissions.

Keywords: pervious concrete, crushed aggregate, round aggregate, sustainability



The content of this work corresponds to the right of expression of the authors and does not compromise the institutional thinking of the University of Cuenca, nor does it release its responsibility before third parties. The authors assume responsibility for the intellectual property and copyrights.

Institutional Repository: <https://dspace.ucuenca.edu.ec/>

Índice de contenido

1. Introducción	7
2. Metodología	8
2.1 Variables experimentales	8
2.2 Materiales	8
2.3 Caracterización de los agregados	9
2.4 Determinación de las proporciones de cada mezcla de hormigón	9
2.5 Fabricación de las probetas de hormigón	9
2.6 Ensayos físico-mecánicos	10
2.7 Análisis de sostenibilidad	11
3. Propiedades de los agregados	12
4. Proporciones de las mezclas de hormigón	14
5. Resultados y discusión	14
5.1 Trabajabilidad	14
5.2 Resistencia a tracción indirecta	15
5.4 Porcentaje de vacíos	20
6. Análisis de sostenibilidad	21
6.1 Objetivos y alcance del análisis	21
6.2 Análisis del inventario	21
6.3 Análisis del impacto	22
6.4 Interpretación	23
7. Conclusiones y recomendaciones	23
Referencias	26

Índice de figuras

Figura 1. Permeámetro utilizado en los ensayos de permeabilidad, con dimensiones.....	10
Figura 2. a) Granulometría árido grueso canto rodado, b) Granulometría árido grueso triturado, c) Granulometría árido fino.....	12
Figura 3. Resultados de los ensayos de asentamiento.....	14
Figura 4. Resultados de los ensayos de tracción indirecta para: a) Hormigones permeables a los 7 días de curado, b) Hormigones permeables a los 14 días de curado, c) Hormigones permeables a los 28 días de curado, d) Hormigones convencionales.....	15
Figura 5. a) Resultados de permeabilidad de las muestras porosas, b) Resistencia a tracción indirecta VS permeabilidad, c) Fotos de los áridos utilizados (triturado y canto rodado de $\frac{3}{4}$ ").....	17
Figura 6. a) Porcentaje de vacíos de las muestras porosas, b) Permeabilidad VS porcentaje de vacíos.....	18

Índice de tablas

Tabla 1. Propiedades de los áridos.....	11
Tabla 2. Proporciones de cada mezcla de hormigón.....	13
Tabla 3. Factores de emisión de los elementos que componen el hormigón.....	20
Tabla 4. Emisiones de CO ₂ de cada mezcla de hormigón.....	20

1. Introducción

Como consecuencia de la expansión urbana los espacios de suelo natural se cubren con materiales impermeables como hormigón o asfalto; esto impide el curso natural del agua ya que eleva los caudales de escorrentía, lo que a su vez puede modificar drásticamente el funcionamiento hidrológico de la cuenca erosionando el suelo y cambiando el rumbo de las vertientes (Shepherd, 2014). Al utilizar recubrimientos impermeables es necesario planificar minuciosamente un sistema de drenaje apropiado ya que, en varias ocasiones, además de consumir recursos y espacio, no puede contener los volúmenes que recibe lo que resulta en inundaciones (Pervious Concrete, s. f.; Solminihac et al., 2007). Impedir la infiltración natural del agua limita la renovabilidad de los recursos hídricos subterráneos y acarrea una alta carga de contaminantes del pavimento hacia el sistema de drenaje, lo cual perjudica la purificación del líquido que a menudo se descarga directamente en vertientes de agua aledañas (ACI, 2006; Singh et al., 2020).

Alternativamente, y como solución a esta problemática, se ha impulsado el desarrollo de pavimentos que proporcionan un material duradero y resistente al imitar, de mejor manera, el comportamiento hidrológico de una superficie de suelo natural. El pavimento de hormigón poroso o permeable representa una de estas soluciones. Se caracteriza por tener una composición baja, e incluso nula, de áridos finos, árido grueso, pasta de cemento y, en ocasiones, aditivos, que en determinadas proporciones permiten la formación de vacíos interconectados para la evacuación de agua (ACI, 2006; Sánchez-Mendieta et al., 2021).

Se ha demostrado que un pavimento de hormigón poroso, además de solucionar los inconvenientes mencionados, reduce significativamente el efecto de isla urbana de calor, pues su estructura no lo retiene, permitiendo la evaporación y transpiración del agua a través de su cuerpo, lo que a su vez enfría tanto la superficie como el ambiente. De igual manera, tiene la capacidad de retener metales pesados arrastrados por la lluvia, como el zinc y el plomo, reduciendo su emisión en un 98% y 100%, respectivamente. Además, se ha demostrado que el uso de concreto poroso premezclado puede reducir el consumo de energía en un 2,97% en comparación con los hormigones convencionales. Esto, a su vez, disminuye la emisión de gases de efecto invernadero en un 2,84% con un costo únicamente del 1% más. Indirectamente, debido a su capacidad para prevenir inundaciones y, por lo tanto, retrasos en el tráfico, se ha demostrado que puede reducir el consumo de energía en un 73% y las emisiones de gases de efecto invernadero en un 47%. Esto lo convierte en un material sostenible de gran importancia para la transición hacia una infraestructura urbana de bajo impacto ambiental (Singh et al., 2020).

El hormigón poroso es muy conocido de forma internacional; el primer registro de su aplicación data de 1852 en Reino Unido, después, a mediados del siglo XIX, fue extendiéndose a lo largo del continente europeo (ACI, 2006). Desde entonces, y hasta la actualidad, se han realizado grandes avances a nivel internacional en el tema. Autores como Sánchez-Mendieta et al. (2021) han recopilado múltiples y extensas investigaciones llevadas a cabo en materia de hormigones porosos con un enfoque en las propiedades físico-mecánicas del material. Otros como Singh et al. (2020) han compilado varios estudios centrados en la sostenibilidad de los pavimentos de hormigón poroso. No obstante, en Ecuador aún son escasos los estudios dedicados al tema. Los estudios de Guaman Zambrano (2019), Núñez Herbozo (2015) y Velez Celi (2018) presentan propuestas realizadas con áridos de las ciudades de Quito, Machala y Pasaje para diversos casos aplicados. A nivel local (en la ciudad de Cuenca, provincia del Azuay), Carvajal y Quishpi (2018) proponen el uso de un pavimento poroso asfáltico para el aeropuerto Mariscal Lamar; sin embargo, no entran en tema de hormigón como es el interés de este trabajo. En Cuenca, a pesar de que la ciudad está rodeada de canteras con amplia disponibilidad de áridos aptos para la elaboración de este material, no existe un estudio dedicado específicamente a hormigones porosos. Así, el objetivo de este trabajo es analizar los beneficios físico-mecánicos y de sostenibilidad de los hormigones porosos versus los hormigones tradicionales elaborados con áridos de la provincia del Azuay.

2. Metodología

2.1 Variables experimentales

Como el principal objetivo de este estudio es variar el tipo de árido, se realizaron mezclas permeables y una convencional utilizando árido grueso canto rodado, árido grueso triturado y una combinación de ambos áridos en proporciones volumétricas iguales. Además, con base en el estudio de Garat et al. (2019) y los resultados obtenidos en el laboratorio, se emplearon tres relaciones volumétricas de agregado grueso/pasta de cemento (AG/PC) para las mezclas permeables: 2,0; 2,5 y 3,0.

2.2 Materiales

Para la elaboración de este trabajo se utilizó el cemento hidráulico tipo HE de la marca Cemento Atenas, en cumplimiento con la norma ASTM C1157. De igual forma, se incluyó el aditivo Plastocrete 161 HE de la marca Sika, clasificado como tipo E según la norma ASTM C494.

De acuerdo a su forma, se consideraron dos tipos de árido grueso: canto rodado de la cantera VIPESA Cia. Ltda. y triturado de la cantera Rookaazul Cia. Ltda. Únicamente en las mezclas de hormigón convencional se utilizó arena proveniente de la cantera VIPESA. Para la elaboración de todos los especímenes se utilizó agua proveniente de la red de agua potable de la ciudad de Cuenca, Ecuador, provista por la empresa ETAPA EP.

2.3 Caracterización de los agregados

Para definir la dosificación teórica de cada mezcla de hormigón se evaluaron los parámetros de peso volumétrico (necesario para el diseño de las mezclas permeables), granulometría, densidad aparente y absorción. Cada uno de estos parámetros se determinó de acuerdo a las normas NTE INEN 858 (2010), NTE INEN 696 (2011) y NTE INEN 857 (2010), respectivamente. Sin embargo, para el árido fino se utilizó la norma NTE INEN 856 (2010) en lugar de la NTE INEN 857 (2010).

2.4 Determinación de las proporciones de cada mezcla de hormigón

Para las muestras de hormigón permeable se tomó como base lo indicado en la guía ACI 211.3R-02 (2006), apéndice 6, en cuanto al proporcionamiento para este tipo de hormigón. Considerando la granulometría obtenida para cada árido grueso, a pesar de estar un poco fuera de los límites, se asumió un tamaño número 8 según la norma ASTM C33 (2018), para de esta forma adoptar las tablas experimentales mostradas en la guía. Las proporciones de la mezcla con la combinación de áridos se determinaron de manera similar, incluyendo partes iguales en volumen (según el peso volumétrico) de cada tipo de árido.

Las proporciones de las mezclas de hormigón convencional se determinaron con base en el ACI 211.1 (2002) en conjunto con el método de Fuller-Thompson, utilizando módulos de finura. Para el caso de la combinación de áridos se consideraron los mismos porcentajes de cada tipo de árido grueso que en las muestras permeables. Se trabajó con el módulo de finura de su granulometría combinada para definir su proporción en la mezcla.

2.5 Fabricación de las probetas de hormigón

Cada muestra se elaboró en moldes cilíndricos de 10 cm de diámetro por 20 cm de altura, siguiendo el procedimiento detallado en la norma NTE INEN 3124 (2017). Se utilizó una mezcladora de hormigón y se compactó por varillado en dos capas con 25 golpes distribuidos. El curado se realizó cubriendo con plástico las muestras recién elaboradas durante 24 horas colocándolas en la piscina de curado del laboratorio de materiales de la Universidad de Cuenca.

2.6 Ensayos físico-mecánicos

De cada mezcla elaborada se realizaron ensayos de asentamiento y tracción indirecta de acuerdo a las normas NTE INEN 1578 (2017) y NTE INEN 2648 (2013), respectivamente. Adicional a esto, se midió la permeabilidad según el reporte ACI 522R-10 (2006), utilizando el permeámetro del laboratorio de materiales de la Universidad de Cuenca (Figura 1). La permeabilidad se determina de acuerdo con la ley de Darcy, tal cual realizan Neithalath et al. (2003), utilizando la Ecuación (1).

$$(1) K = \frac{A_1 * L}{A_2 * t} * \log\left(\frac{h_2}{h_1}\right)$$

Donde:

- K – Permeabilidad en centímetros por segundo.
- A₁ – Área transversal del tubo del permeámetro.
- A₂ – Área transversal de la muestra de hormigón.
- L – Longitud de la muestra de hormigón.
- t – Tiempo en segundos del ensayo.
- h₁ – Altura inicial del ensayo.
- h₂ – Altura final del ensayo.

Para las dimensiones del permeámetro y muestras utilizadas, exhibidas en la Figura 1, la Ecuación (1) puede reestructurarse en la Ecuación (2).

$$(2) K = \frac{A}{t}$$

Donde:

- K – Permeabilidad en centímetros por segundo.
- A – Constante del ensayo = 13,61 cm.
- t – Tiempo en segundos del ensayo.

Adicionalmente, se determinó el porcentaje de vacíos interconectados utilizando el principio de Arquímedes, obteniendo el peso seco y sumergido de las muestras de hormigón y se calculó de acuerdo a la Ecuación (3) (Garat et al., 2019).

$$(3) P_v = 100 * \frac{V_p - (P_D - P_S) / \rho_a}{V_p}$$

Donde:

- P_v – Porcentaje de vacíos de la muestra de hormigón.
- V_p – Volumen de la probeta considerando poros interconectados
- P_D – Peso seco de la muestra de hormigón.
- P_S – Peso sumergido de la muestra de hormigón.
- P_a – Densidad del agua.

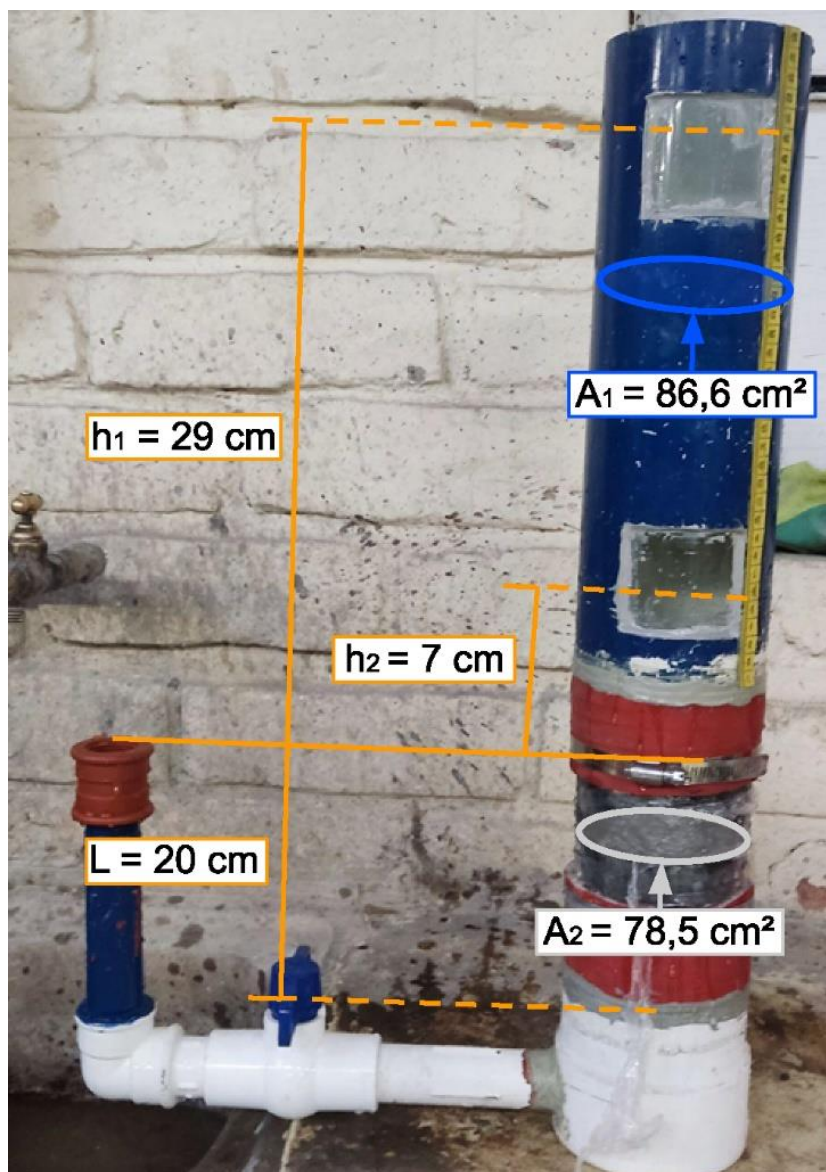


Figura 1. Permeámetro utilizado en los ensayos de permeabilidad, con dimensiones.

2.7 Análisis de sostenibilidad

Para este análisis, se consideraron las emisiones de CO₂ producidas por cada mezcla de hormigón, evaluando su impacto de acuerdo a la metodología de la norma ISO 14040 (2006) respecto al análisis del ciclo de vida de un producto.

3. Propiedades de los agregados

El resumen de propiedades determinadas de cada árido se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1. Propiedades de los áridos

Tipo de árido	Peso volumétrico (kg/m³)	Densidad aparente (kg/m³)	Absorción	Módulo de finura
Grueso canto rodado	1 562,75	2 683,34	1,85%	7,02
Grueso triturado	1 404,14	2 651,97	3,42%	7,13
Fino	-	2 687,42	5,27%	2,69

Del análisis granulométrico de cada árido (Figura 2) se determinó que la distribución de partículas era muy similar para los áridos de canto rodado y triturado. En ambos casos, el tamaño máximo nominal es de $\frac{3}{4}$ " (19 mm), con una notable mayoría de material retenido en el tamiz de $\frac{1}{2}$ " (12,5 mm). Se debe mencionar que el canto rodado contiene un porcentaje considerable (22,52%) de material que pasa a través del tamiz de $\frac{1}{2}$ " (12,5 mm), en comparación con el 1,97% que contiene el árido triturado. La curva granulométrica del árido fino a utilizarse en las mezclas de hormigón convencional presenta una distribución uniforme de partículas, cumpliendo con la norma NTE INEN 872 (2011), la cual establece los requisitos para su utilización en la elaboración de hormigón.

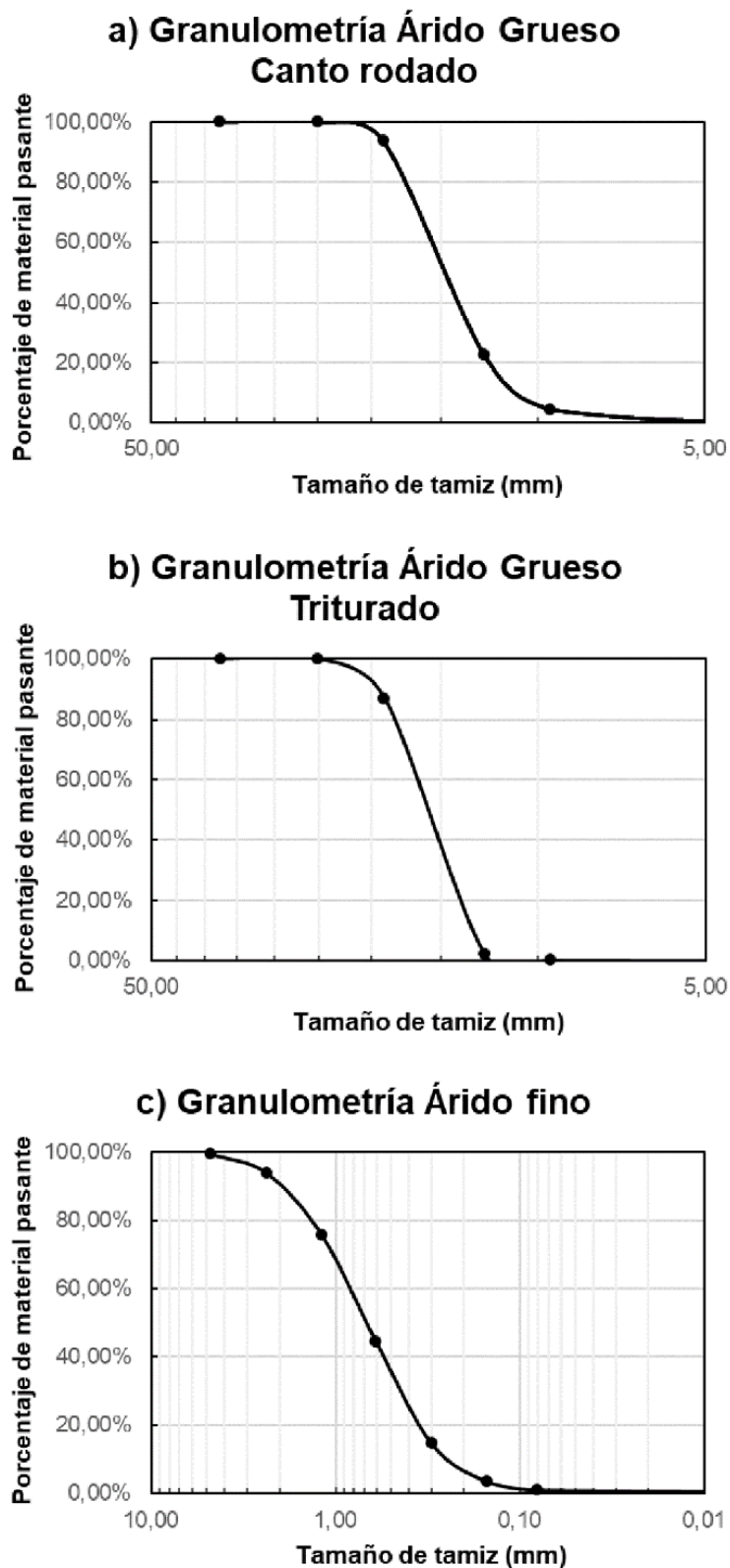


Figura 2. a) Granulometría árido grueso canto rodado, b) Granulometría árido grueso triturado, c) Granulometría árido fino

4. Proporciones de las mezclas de hormigón

La experiencia en el laboratorio arrojó mejores resultados al mantener una relación agua-cemento (a/c) de 0,25 e incluir un 3% de aditivo por peso de cemento. Estos parámetros se mantuvieron constantes para todas las muestras elaboradas, incluyendo las de hormigón convencional. El resumen de las proporciones determinadas para cada mezcla se presenta en la Tabla 2.

Tabla 2. Proporciones de cada mezcla de hormigón

Mezclas Permeables			
	Relación AG/PC		
Tipo de Árido	2,00	2,50	3,00
	Contenido de cemento (kg/m³)		
Canto Rodado	472,13	377,70	314,75
Triturado	424,21	339,37	282,81
Combinación de áridos	450,68	360,54	300,45
Mezclas convencionales			
Tipo de Árido	Cemento (kg/m³)	Árido Grueso (kg/m³)	Árido Fino (kg/m³)
Canto Rodado	760,00	676,51	709,01
Triturado	760,00	656,26	721,52
Combinación de áridos	760,00	351,21	715,02

5. Resultados y discusión

5.1 Trabajabilidad

Los ensayos de asentamiento muestran una tendencia similar para cada tipo de árido a medida que varía la relación AG/PC (Figura 3). Las muestras más trabajables se encontraron utilizando árido canto rodado, ya que, como era de esperar, la forma suave y redondeada de las partículas de este material facilita el movimiento entre ellas, lo que permite un mayor asentamiento. Por otro lado, el árido triturado, por la forma angular de sus partículas, demostró un menor desempeño al momento de evaluar revenimiento, no obstante, no resultó ser el caso más desfavorable, pues la variedad morfológica de las partículas en la composición del hormigón con la combinación de ambos áridos, aumentó la trabazón entre las mismas, resultando ser el caso con menores valores de asentamiento en todos los ensayos.

Se puede apreciar además la sensibilidad del revenimiento en función de la relación AG/PC adoptada. Para un valor de 2,00, al tener un exceso de pasta de cemento con un contenido reducido de agua, no se observó ningún revenimiento en todos los casos, a pesar de tener un alto porcentaje de plastificante incluido. Sin embargo, al aumentar únicamente en 0,5 la relación, se obtienen resultados de hasta 220 mm. Esto se debe al equilibrio entre la cohesión de la pasta de hormigón y el peso del árido grueso. Finalmente, en la última relación, la trabajabilidad se reduce un poco debido a la falta de pasta que lubrique el movimiento entre las partículas de árido grueso. En concordancia con lo mencionado anteriormente, el asentamiento en las mezclas de hormigón convencional, al tener la misma relación a/c que la pasta de las muestras permeables, fue nulo en todos los casos, por lo que estos resultados no se muestran en la Figura 3.

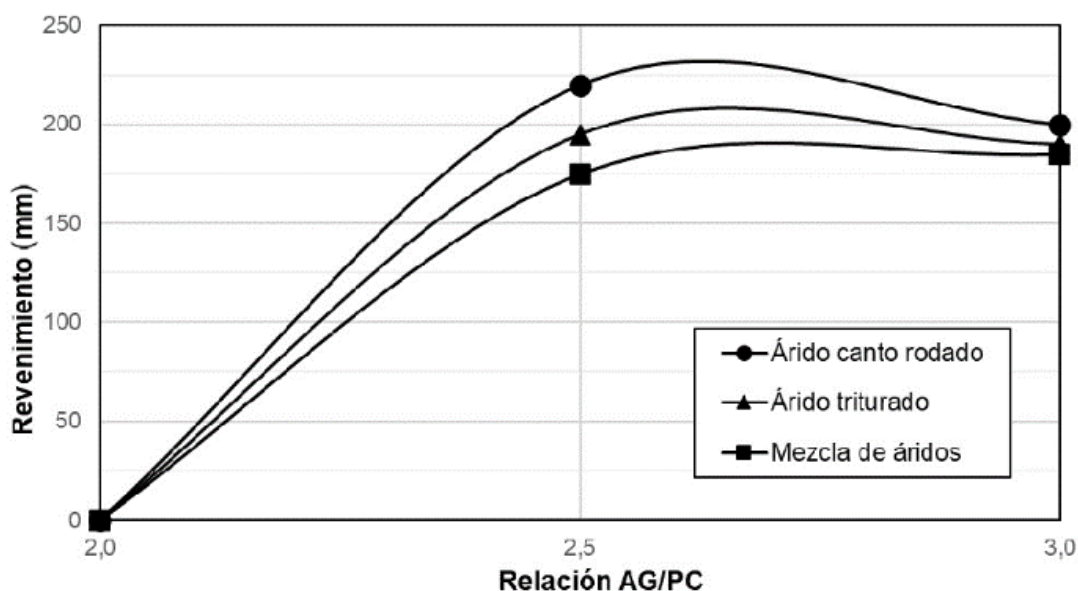


Figura 3. Resultados de los ensayos de asentamiento

5.2 Resistencia a tracción indirecta

En edades tempranas del hormigón permeable se observa una dispersión de datos en cuanto a resistencia a la tracción indirecta (Figura 4a). Esto se atribuye al bajo desarrollo de resistencia del cemento, lo que indica que el acomodamiento y la trabazón aleatoria de las partículas de árido grueso tienen una mayor influencia en estos resultados, que parecen ser aleatorios. Para las muestras curadas durante 14 y 28 días, es evidente que la resistencia es inversamente proporcional a la relación AG/PC. Además, se observa que los resultados son relativamente bajos debido al bajo contenido de pasta de cemento, la ausencia de arena y el

tamaño del agregado. Teniendo en cuenta que se utilizó cemento tipo HE, se puede observar que los resultados a los 14 y 28 días son similares.

El hormigón elaborado con la combinación de áridos demostró tener los mejores resultados al ser, hasta un 12%, más resistente respecto de las muestras que contienen únicamente árido triturado, caso que secunda en desempeño para este ensayo; el hormigón con árido canto rodado resultó el caso de menor resistencia. Contrario a lo obtenido en el ensayo de revenimiento, en este ensayo los resultados demuestran ser inversamente proporcionales a la relación AG/PC.

Contrastando con las muestras de hormigón convencional en primer lugar, se corrobora que, para mezclas similares en las que solo se varía el tipo de agregado grueso, los ensayos de tracción indirecta muestran un mejor rendimiento cuando se utiliza la combinación de áridos; en segundo lugar, se encuentra la muestra con árido triturado, y finalmente, el canto rodado. De igual forma, se puede apreciar cómo la resistencia es considerablemente mayor, aumentando hasta 13,5 veces los valores obtenidos en los casos permeables. Además, de acuerdo al tipo de árido grueso utilizado, la diferencia en resistencia con respecto a su versión permeable es menor cuando la trabajabilidad del hormigón es más baja, lo que resalta la importancia de este parámetro.

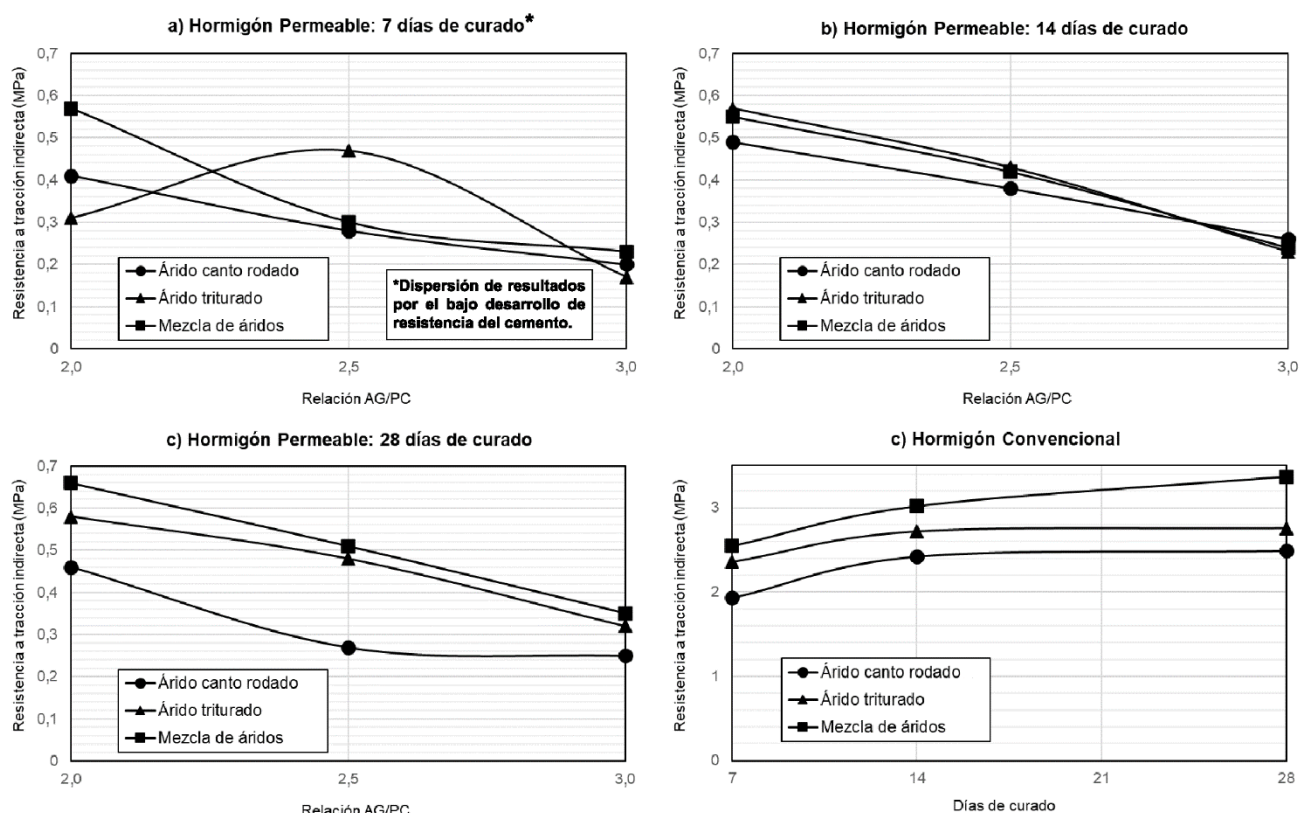


Figura 4. Resultados de los ensayos de tracción indirecta para: a) Hormigones permeables a los 7 días de curado, b) Hormigones permeables a los 14 días de curado, c) Hormigones permeables a los 28 días de curado, d) Hormigones convencionales.

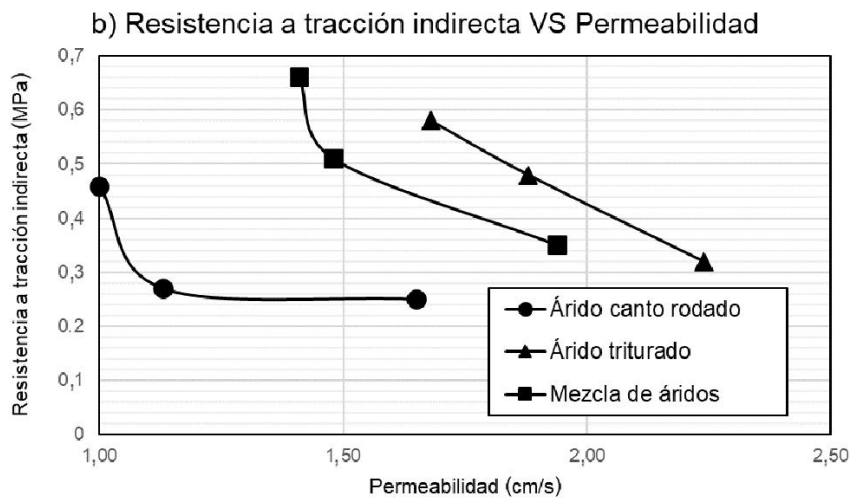
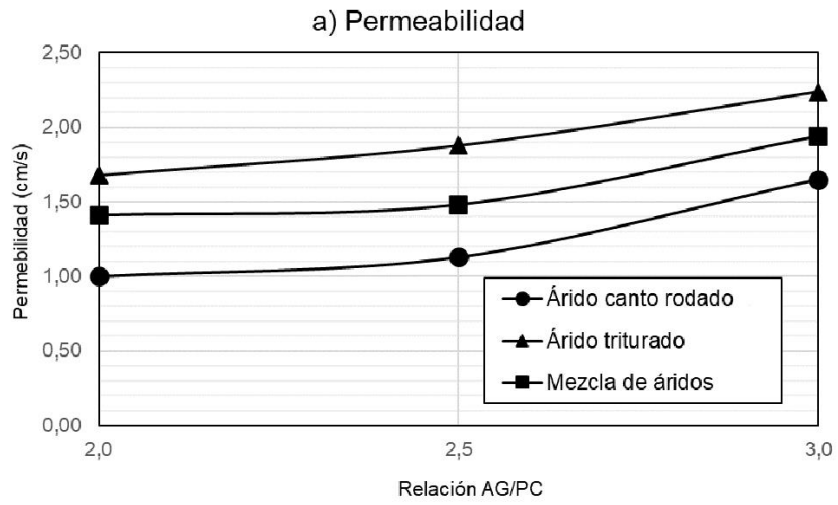
5.3 Permeabilidad

Al considerar el árido utilizado y las relaciones AG/PC adoptadas, se esperaban valores elevados de permeabilidad entre 0,4 y 1,25 cm/s; no obstante, los ensayos reflejaron resultados sobre lo estimado en el diseño, que alcanzaron valores de hasta 2,24 cm/s. A pesar de la forma suave y redondeada del canto rodado, que se esperaría facilite el drenaje de agua, los resultados presentes en la Figura 5a, muestran que el hormigón con la permeabilidad más baja resultó ser aquel elaborado con este material. Se atribuye esto al porcentaje mayor de material pasante del tamiz de 1/2" (12,5 mm), con respecto al árido triturado, de la granulometría observada en la sección 3, y a la presencia de partículas planas y alargadas, como se puede observar en la Figura 5c, que perjudican la formación de vacíos interconectados en la estructura de la probeta (porcentaje de vacíos) y complican el trayecto del agua a través de la misma. Corroborando esto se observa que, conforme se disminuye la cantidad de árido canto rodado y se incluye árido triturado, la permeabilidad aumenta, por lo que la forma angular pareciera no afectar tanto este parámetro. Cabe destacar que el árido triturado es más uniforme, con piedras de tamaño y forma similares, lo cual resulta

conveniente para la formación de espacios más grandes entre las partículas y trayectos más directos para la evacuación del agua.

Poniendo en contraste la resistencia a tracción indirecta a los 28 días con la permeabilidad del hormigón, en la Figura 5b, se verifica que, a mayor permeabilidad, menor resistencia. De igual forma, la relación AG/PC se muestra como un factor determinante para aumentar la resistencia o la permeabilidad del hormigón. Se puede observar cómo, entre las relaciones AG/PC de 2,5 y 3,0, se puede mejorar la permeabilidad hasta en un 46% o disminuir la resistencia hasta en un 41%, dependiendo del árido utilizado. Cabe destacar que mientras mayores sean los resultados de permeabilidad o resistencia a tracción indirecta, obtenidos con cada tipo de árido, mayor será el beneficio que se puede obtener modificando la relación AG/PC.

Es importante señalar que el ensayo de permeabilidad del reporte ACI 522R-10 (2006) no está diseñado para medir la capacidad de filtración de las muestras de hormigón convencional, por lo que se aproximan estos valores a 0 cm/s. Figura 5. a) Resultados de permeabilidad de las muestras porosas, b) Resistencia a tracción indirecta VS permeabilidad, c) Fotos de los áridos utilizados (triturado y canto rodado de $\frac{3}{4}$ ").



c) Fotos de los áridos utilizados

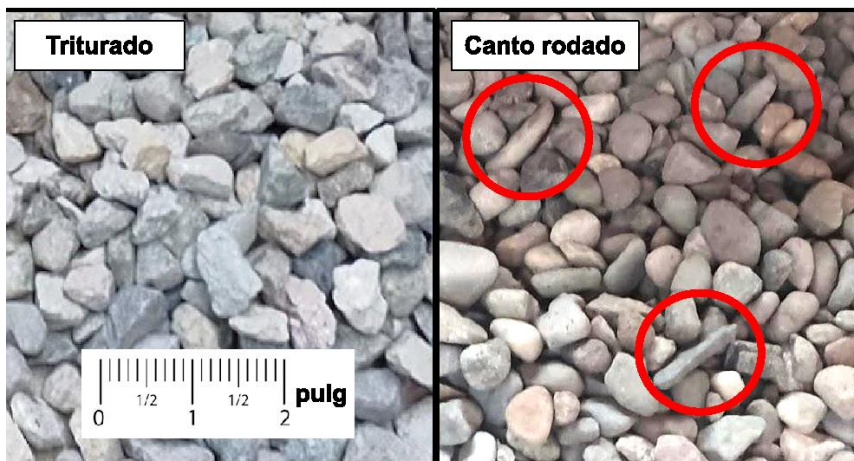


Figura 5. a) Resultados de permeabilidad de las muestras porosas, b) Resistencia a tracción indirecta VS permeabilidad, c) Fotos de los áridos utilizados (triturado y canto rodado de 3/4")

5.4 Porcentaje de vacíos

La permeabilidad y el porcentaje de vacíos son directamente proporcionales, por lo tanto, su comportamiento con respecto a la relación AG/PC es ascendente, obteniéndose los mayores resultados para el hormigón con árido triturado, seguido de la combinación de áridos y, finalmente, el canto rodado. Los valores obtenidos son elevados en todos los casos, con porcentajes entre el 28% y el 36%, lo que confirma las altas permeabilidades (Figura 6a).

Considerando que el porcentaje de vacíos y la permeabilidad superaron con creces la estimación inicial (entre 0,4 y 1,25 cm/s) para el diseño según la guía ACI 211.3R-02 , y sabiendo que se asumieron propiedades similares al árido de estudio en la guía, se elaboró la Figura 6b, donde se reflejan los resultados experimentales de este ensayo, que en conjunto con la Figura 5b pueden servir para el diseño futuro de mezclas permeables de hormigón que incluyan los áridos considerados en este estudio.

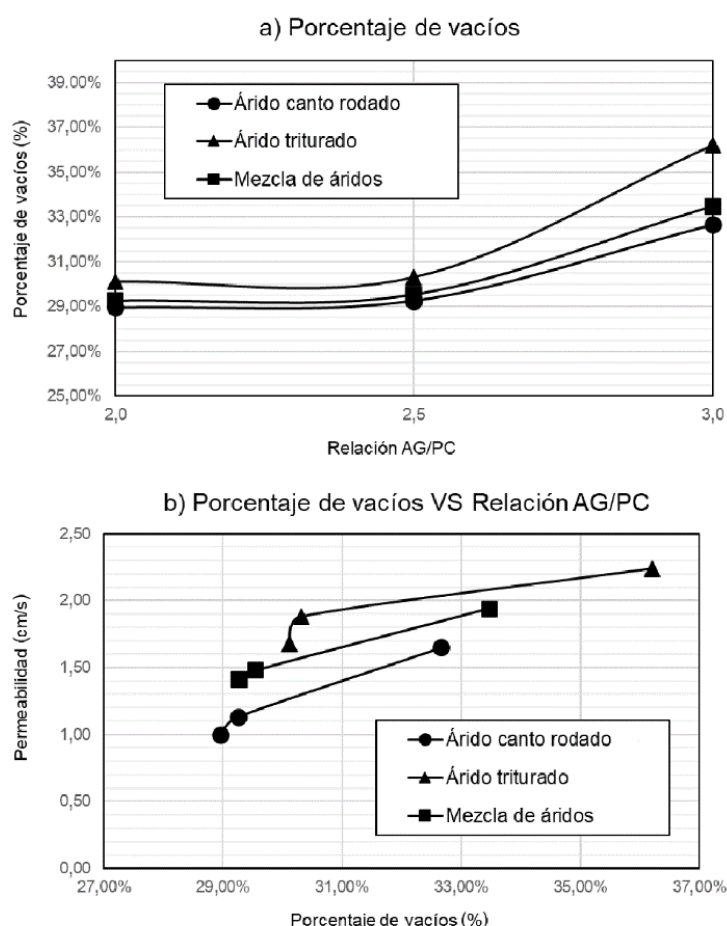


Figura 6. a) Porcentaje de vacíos de las muestras porosas, b) Permeabilidad VS porcentaje de vacíos

6. Análisis de sostenibilidad

6.1 Objetivos y alcance del análisis

En esta sección se busca analizar y comparar el impacto de cada mezcla de hormigón elaborada con base en las emisiones de CO₂ producidas desde la extracción hasta el procesamiento del volumen de materias primas utilizado en cada muestra. En lo que respecta al alcance se asumen factores de emisión similares para el proceso de transporte, mezcla y elaboración para todas las muestras consideradas, por lo que, para el carácter comparativo del estudio, se omiten en el inventario las emisiones producidas por estos procesos. De esta forma se define como unidad funcional el material hormigón, ya sea permeable o convencional, con cada tipo de árido, para el cual se establece el flujo de referencia en metros cúbicos de producción.

6.2 Análisis del inventario

Para cuantificar las emisiones de CO₂ se acudió a bibliografía existente y bases de datos de uso libre disponibles en línea, recopilando factores de emisión de este parámetro para cada material que compone el hormigón. Por la escasez de datos disponibles en referencias nacionales, se utilizaron valores de fuentes extranjeras, teniendo en cuenta promedios locales y globales. Para el caso del aditivo plastificante, se trabajó con base en la declaración ambiental de producto a cargo de la European Federation of Concrete Admixtures Association sobre los plastificantes producidos por Sika en España (EFCA, 2021).

Se consultaron las bases de datos WebFIRE de la EPA (2022), AusLCI (2022) y Korea LCI Database (2021), compaginando con valores consultados en bibliografía existente en los estudios de Arbelaez et al. (2022) y Hammond y Jones, (2011). La gama completa de datos procedentes de estas fuentes muestra una gran dispersión, lo que hace incierta la selección de los "mejores" valores. No obstante, al comparar los datos, se descartaron los valores extremos y se seleccionó una fuente con un valor intermedio entre todos los valores consultados. La Tabla 3 resume los valores adoptados con su respectiva fuente de referencia.

Tabla 3. Factores de emisión de los elementos que componen el hormigón

Material	Factor de emisión de CO ₂ (kg-CO ₂ /kg)	Referencia
Cemento	0,83	Arbeláez et al., (2022)
Agua	3,32 x 10 ⁻⁴	Korea LCI Database, (2021)
Arena	4,80 x 10 ⁻³	Hammond y Jones, (2011)
Árido grueso canto rodado	4,30 x 10 ⁻³	Korea LCI Database, (2021)
Árido grueso triturado	6,20 x 10 ⁻³	Arbeláez, et al., (2022)
Aditivo plastificante	1,53	EFCA (2021)

6.3 Análisis del impacto

Al centrar el objetivo en las emisiones de CO₂, la categoría de impacto del estudio recae únicamente en el cambio climático, siendo este mismo parámetro el indicador predominante. De igual forma, la caracterización se evalúa y compara de manera directa las emisiones de CO₂ calculadas para cada mezcla de hormigón.

El modelo del estudio determinó la emisión total de CO₂ por metro cúbico de hormigón considerando las proporciones de cada material en cada muestra, multiplicándolas por su respectivo factor emisión. La Tabla 4 resume las emisiones estimadas de CO₂ mediante este método.

Tabla 4. Emisiones de CO₂ de cada mezcla de hormigón

Mezclas Permeables			
Tipo de Árido	Relación AG/PC		
	2,00	2,50	3,00
Emisiones de CO ₂ (kg/m ³)			
Canto Rodado	420,23	338,29	283,14
Triturado	378,27	303,95	254,40
Combinación de áridos	402,42	323,46	270,83
Mezclas convencionales			
Tipo de Árido	Emisiones de CO ₂ (kg/m ³)		
Canto Rodado	672,06		
Triturado	673,34		
Combinación de áridos	672,65		

6.4 Interpretación

Se puede apreciar que, para las mezclas de hormigón convencional, las emisiones son muy similares entre muestras con distintos tipos de árido, manteniéndose entre 672 y 673 kg-CO₂/m³. Esto se debe a que la metodología de dosificación resultó en proporciones casi idénticas, debido a la granulometría similar del agregado.

Entre muestras permeables, la variación de emisiones de acuerdo al tipo de árido utilizado son mucho más significativas. Esto se debe a que, en el método de dosificación considerado, el peso volumétrico es el parámetro más determinante que al no ser uniforme entre cada tipo de árido, como es la granulometría, se obtienen mezclas con una mayor dispersión en sus proporciones. Se puede apreciar cómo las emisiones disminuyen en proporción inversa a la relación AG/PC. Estas emisiones son mayores para el árido canto rodado y menores para el triturado. Por lo tanto, la combinación de estos dos áridos resulta en un valor intermedio.

Es notable también que existe una gran reducción de emisiones, del 70% al 150%, entre los casos permeables y los casos convencionales. Esto se debe a la ausencia de arena, lo cual reduce las emisiones asociadas con la producción de este material. Sin embargo, la cantidad de cemento incluida en cada mezcla es el factor principal que contribuye a estas emisiones, ya que el cemento es el segundo material con mayor producción de CO₂, después del aditivo plastificante. Esto se refleja en la manera en que, a medida que la relación AG/PC aumenta, las emisiones se reducen.

7. Conclusiones y recomendaciones

Se puede concluir que, en términos de trabajabilidad, el hormigón permeable elaborado con árido canto rodado presenta las mejores características, alcanzando un revenimiento de hasta 220 mm. Curiosamente, la forma angular de las partículas del árido grueso triturado no resultó tener menor revenimiento, sino en el hormigón elaborado con la mezcla de ambos áridos. Se atribuye esto a la complementariedad que puede tener la mezcla de ambas morfologías de los agregados, lo cual resulta en una mayor trabazón y, por ende, menor trabajabilidad. Además, se debe tener en cuenta que una mayor cantidad de pasta de cemento puede ser contraproducente para la trabajabilidad. Por la misma razón, los resultados de las mezclas convencionales, que mantuvieron una baja relación a/c con el fin de mantener la misma pasta de cemento, siempre resultaron nulos. Se sugiere considerar una pasta distinta para el hormigón convencional en futuros estudios.

Los resultados de resistencia a tracción indirecta fueron inversamente proporcionales a la trabajabilidad. Al variar únicamente el tipo de árido grueso, los factores morfológicos y de resistencia interna de las partículas del agregado se convierten en las variables determinantes en los resultados de este ensayo. Dado que estos están correlacionados de manera inversa con la trabajabilidad del hormigón, se puede deducir que es un parámetro crucial en el desempeño del hormigón permeable. Para verificar esto, en un estudio futuro, se podría analizar la resistencia interna de los diferentes áridos gruesos y comprobar su influencia en la resistencia de los hormigones porosos en contraste con el revenimiento. Por el tamaño del agregado y la ausencia de arena, estos resultados fueron relativamente bajos, incluso para hormigones permeables, con valores entre 0,25 y 0,66 MPa a los 28 días de curado. Por otro lado, los hormigones convencionales, al tener una baja relación a/c generaron resistencias de hasta 3,37 MPa, lo que explica la amplia diferencia en los resultados. En base a esto, se puede realizar un estudio utilizando un árido grueso más pequeño, que incluya arena, y compararlo con una mezcla patrón de menor relación a/c. De todas formas, se verifica que debido a su cualidad permeable, se sacrifica en gran medida la resistencia del hormigón. Además, se comprobó la influencia del árido en las mezclas convencionales. Esto corroboró los resultados obtenidos en las mezclas permeables, demostrando que las mezclas convencionales también presentan mayores resistencias en el mismo orden de acuerdo al agregado incluido.

En cuanto a permeabilidad, una distribución uniforme en tamaño y forma de las partículas de agregado grueso demostró ser más relevante que la forma en sí, angular o redondeada, de los áridos utilizados, siendo el hormigón más permeable aquel elaborado con árido triturado, alcanzando 2,24 cm/s con la relación AG/PC de 3,0 y el menos permeable el que contiene canto rodado, verificándose esto en el porcentaje de vacíos obtenido para cada muestra, siendo 32% y 36% para el hormigón elaborado con árido de canto rodado y triturado respectivamente en su versión con relación AG/PC de 3,0, donde a pesar de tener tamaños de partículas similares, la forma irregular del canto rodado impidió la formación de vacíos interconectados en la estructura del hormigón. Lo interesante en este punto es que utilizando la combinación de agregados se puede mejorar la resistencia del hormigón, sacrificando un poco la permeabilidad. Esto se pudo observar en la Figura 5b. Los resultados de este hormigón mejoran significativamente la resistencia de las mezclas que contienen únicamente canto rodado y están muy cerca de los valores de permeabilidad obtenidos para el árido grueso triturado. Para un estudio futuro, se sugiere realizar un cribado del porcentaje de

material que pasa a través del tamiz de $\frac{1}{2}$ " (12,5 mm) con el fin de eliminar la variabilidad en los tamaños de los agregados y evaluar únicamente la influencia de su forma.

En el ámbito de la sostenibilidad, se ha demostrado que la morfología del árido y su peso volumétrico son factores relevantes en las emisiones de CO₂ en hormigones permeables. Esto se debe a que, según la metodología de diseño utilizada, un material que ocupe un mayor volumen suelto por metro cúbico requerirá una mayor cantidad de cemento para lograr la relación AG/PC adoptada y la permeabilidad deseada. Es así que, en términos de sostenibilidad, el hormigón permeable elaborado con árido grueso triturado es la opción más conveniente. Esto se debe a que tiene un peso volumétrico de 1 404 kg/m³ en comparación con los 1 563 kg/m³ del canto rodado. Además, requiere 283 kg/m³ de cemento en contraste con los 315 kg/m³ del hormigón elaborado con canto rodado (considerando una relación AG/PC de 3,0). Como resultado, se reducen las emisiones en un 10%, disminuyendo de 283 a 254 kg-CO₂/m³. En este caso, la baja relación a/c adoptada afectó de igual forma los resultados de las mezclas convencionales, resultando en valores elevados que contrastan demasiado con sus versiones porosas. En un futuro estudio, se recomendaría considerar una mezcla de diferentes características como patrón.

Finalmente, habiendo recopilado toda esta información, se puede concluir que el hormigón con las mejores prestaciones resultó ser aquel elaborado con árido grueso triturado. Es importante mencionar que incluir una parte de árido grueso canto rodado puede ayudar a mejorar la resistencia sin disminuir en gran medida la permeabilidad, la trabajabilidad o afectar las emisiones producidas. Se verifica que, en hormigones porosos, a medida que aumenta la relación AG/PC, se obtiene una mayor trabajabilidad, una menor resistencia, una menor cantidad de emisiones de CO₂ y una mayor permeabilidad. Comparando las muestras convencionales, se comprueba que el mayor contraste se produce en la resistencia. Se sugiere realizar futuros estudios con mezclas patrón distintas para obtener comparaciones más concluyentes en los ensayos ejecutados. Para estos fines, se pueden utilizar como base los datos experimentales obtenidos en este estudio para diseñar hormigones de acuerdo a una metodología ajustada a los materiales locales.

Referencias

- ACI 211.3R-02: *Guide for Selecting Proportions for No-Slump Concrete*. (2006). Documento técnico.
- ACI 522R-06: *Pervious Concrete*. (2006). Documento técnico.
- American Concrete Institute. (2002). *Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete* (ACI 211.1).
- American Society for Testing and Materials. (2018). *Standard Specification for Concrete Aggregates* (ASTM C33/C33M).
- Arbeláez Pérez, O. F., Delgado Varela, K. A., & Castañeda Mena, J. D. (2022). Efecto de la incorporación de ceniza de bagazo de caña en las propiedades mecánicas y las emisiones de dióxido de carbono del hormigón preparado con residuos de vidrio. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*. <https://doi.org/10.1016/j.bsecv.2022.08.001>
- Australian Life Cycle Assessment Society. (2022). *AusLCA* [Conjunto de datos]. <https://www.auslci.com.au/index.php/EmissionFactors>
- Carvajal Siguencia, A. G., & Quishpi Machuca, O. C. (2018). *Diseño de pavimento asfáltico poroso para el aeropuerto Mariscal La Mar de Cuenca*. Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador.
- David D. Shepherd. (2014). *Rainwater Runoff – What’s the Problem?* https://www.cement.org/docs/default-source/fc_mat-app_pdfs/pervious-concrete/rainstormwater-runoff-tech-brief-dds-revisions-v2_pf_final.pdf?sfvrsn=2
- European Federation of Concrete Admixtures Associations. (2021). *Environmental Product Declaration: Concrete admixtures – Plasticizers and Superplasticizers*. <https://www.efca.info/efca-publications/environmental/#>
- Garat, M. E., Palacio, A. J., Larenze, G. R., & Sota, J. D. (2019). Desempeño Hidrológico y Propiedades Físico Mecánicas de Hormigones Porosos elaborados con áridos de la Provincia de Entre Ríos. *Revista Tecnología y Ciencia*, 36, 81-104.
- Guaman Zambrano, M. F. (2019). *Propuesta de un pavimento de concreto permeable para estacionamientos en zonas urbanas, que evite el estancamiento de aguas pluviales*. Universidad Técnica de Machala, Machala, Ecuador.
- Hammond, G.; Jones, C (2011). *Embodied Carbon: The Inventory of Carbon and Energy*.
- International Organization for Standardization. (2006). *Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework*. (ISO 14040).
- Korea Environmental Industry & Technology Institute. (2021). *Korea LCI Database* [Conjunto de datos]. <https://www.greenproduct.go.kr/epd/eng/lci/lciCo200.do>

- Neithalath, N.; Weiss, W. J.; and Olek, J. (2003), *Development of Quiet and Durable Porous Portland Cement Concrete Paving Materials, Final Report, The Institute for Safe, Quiet, and Durable Highways*, 179 pp.
- Núñez Herbozo, F. J. (2015). *Fabricación de hormigón permeable para canchas de uso múltiple con la utilización de agregados de la provincia de Pichincha*. Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Quito, Ecuador.
- Pervious Concrete. (s. f.). PCA. Recuperado de <https://www.cement.org/cement-concrete/cement-specific-materials/pervious-concrete>
- Sánchez-Mendieta, C., Galán, J. J., & Martínez-Lage, I. (2021). Physical and Hydraulic Properties of Porous Concrete. *Sustainability*, 13(19), 10562.
- Servicio Ecuatoriano de Normalización. (2010). *Áridos. Determinación de la masa unitaria (peso volumétrico) y el porcentaje de vacíos*. (NTE INEN 858)
- Servicio Ecuatoriano de Normalización. (2010). *Áridos. Determinación de la densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del árido grueso*. (NTE INEN 857).
- Servicio Ecuatoriano de Normalización. (2010). *Áridos. Determinación de la densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del árido fino*. (NTE INEN 856).
- Servicio Ecuatoriano de Normalización. (2011). *Áridos para hormigón. Requisitos*. (NTE INEN 872).
- Servicio Ecuatoriano de Normalización. (2011). *Áridos. Análisis granulométrico en los áridos, fino y grueso*. (NTE INEN 696).
- Servicio Ecuatoriano de Normalización. (2013). *Hormigón de cemento hidráulico. Determinación de la resistencia a la tracción por compresión diametral de especímenes cilíndricos de hormigón* (NTE INEN 2648).
- Servicio Ecuatoriano de Normalización. (2017). *Hormigón de cemento hidráulico. Determinación del asentamiento* (NTE INEN 1578).
- Servicio Ecuatoriano de Normalización. (2017). *Hormigón. Elaboración y curado de especímenes de ensayo en el laboratorio* (NTE INEN 3124).
- Singh, A., Sampath, P. V., & Biligiri, K. P. (2020). A review of sustainable pervious concrete systems: Emphasis on clogging, material characterization, and environmental aspects. *Construction and Building Materials*, 261, 120491.
- Solminihac, H., Videla, C., Fernandez, B., & Castro, J. (2007). Desarrollo de mezclas de hormigón poroso para pavimentos urbanos permeables. *Materiales De Construcción - MATER CONSTR*, 57.
- United States Environmental Protection Agency. (2022). *WebFIRE* [Conjunto de datos]. <https://cfpub.epa.gov/webfire/index.cfm?action=fire.downloadInBulk>

Velez Celi, A. F. (2018). *Diseño de hormigones porosos para parques automotores de la cantera San Luis de la ciudad de Pasaje*. Universidad Técnica de Machala, Machala, Ecuador.