


RESEARCH ARTICLE

Análisis de las propiedades mecánicas y de filtración del hormigón poroso al modificar la relación agua/cemento

Molina Andrade Marco Antonio ¹  Reyes Novillo José David ¹  Naspud Uruchima Pilar Roxana ¹ 
Paúl Illescas-Cárdenas ¹ 

¹ Universidad Católica de Cuenca Campus Azogues, Unidad Académica de Ingeniería, Industria y Construcción, Facultad de Ingeniería Civil

✉ Correspondencia: jose.reyes@est.ucacue.edu.ec ☎ + 593 999 007 636

DOI/URL: <https://doi.org/10.53313/gwj71107>

Resumen: El hormigón poroso surge como una solución innovadora para los problemas de acumulación de aguas en las calzadas, causantes de problemas sanitarios y estéticos. A diferencia de los métodos tradicionales de drenaje, el hormigón poroso ofrece ventajas significativas en términos de salubridad y durabilidad del pavimento. Sin embargo, su aplicación adecuada en Ecuador se ve limitada por la falta de investigación en el país. Este estudio analiza la influencia de la relación agua/cemento (a/c) en las propiedades mecánicas e hidráulicas del hormigón poroso, utilizando la metodología del reporte ACI 522 R-10. Se concluye que relaciones a/c elevadas favorecen la resistencia del hormigón, aumentando la densidad de los cilindros, mientras que una menor porosidad y contenido de pasta se relacionan con tasas de infiltración más altas. Se determina que una relación a/c de 0.42 equilibra estas características, proporcionando un punto de referencia para la dosificación del hormigón poroso. Este estudio destaca la importancia de entender y controlar la relación a/c en la producción de hormigón poroso para optimizar sus propiedades y aplicaciones.

Palabras claves: Compresión, hormigón poroso, permeabilidad, relación a/c, tracción indirecta.

Analysis of the mechanical and filtration properties of porous concrete by modifying the water/cement ratio

Abstract: Porous concrete emerges as an innovative solution to the problems of water accumulation in roadways, which cause sanitary and aesthetic problems. Unlike traditional drainage methods, porous concrete offers significant advantages in terms of pavement health and durability.

However, its proper application in Ecuador is limited by the lack of research in the country. This study analyzes the influence of the water/cement (w/c) ratio on the mechanical and hydraulic properties of porous concrete, using the methodology of the ACI 522 R-10 report. It is concluded that high w/c ratios favor concrete strength, increasing



Cita: Molina, M., Reyes, J., Naspud, P., & Illescas, P. (2024). Análisis de las propiedades mecánicas y de filtración del hormigón poroso al modificar la relación agua/cemento. *Green World Journal*, 7(1), 103. <https://doi.org/10.53313/gwj71107>

Received: 12/enero /2024
Accepted: 20/febrero /2024
Published: 13/marzo /2024

Prof. Carlos Mestanza-Ramón, PhD.
Editor-in-Chief / CaMeRa Editorial
editor@greenworldjournal.com

Editor's note: CaMeRa remains neutral with respect to legal claims resulting from published content. The responsibility for published information rests entirely with the authors.



© 2024 CaMeRa license, Green World Journal. This article is an open access document distributed under the terms and conditions of the license. Creative Commons Attribution (CC BY). <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>

cylinder density, while lower porosity and paste content are related to higher infiltration rates. A w/c ratio of 0.42 is determined to balance these characteristics, providing a benchmark for porous concrete batching. This study highlights the importance of understanding and controlling the w/c ratio in the production of aerated concrete to optimize its properties and applications.

Keywords: Compresión, hormigón poroso, permeabilidad, relación a/c, tracción indirecta.

1. Introducción

La actividad humana y el consecuente cambio climático ha desencadenado grandes inconvenientes ambientales, sobre todo en las épocas de lluvias, afectando a las estructuras, el ambiente y la población. El escurrimiento superficial generado por la topografía irregular, además de perjudicar a la comodidad de los transeúntes, ocasiona un retardo en la capacidad de recarga en los acuíferos y maximiza las posibilidades de inundaciones en las zonas urbanas. Adicionalmente, debido a la fuerza de arrastre, conduce materiales contaminantes depositándolos en las calles y zonas de parqueo de vehículos (Ximenes et al., 2022).

En este contexto, en busca de minimizar los daños originados por las escorrentías, se desarrollan nuevas tecnologías, entre ellas la implementación de capas de rodadura que permitan el paso del agua a través de su estructura, caracterizadas por permitir infiltración de las aguas pluviales (Ximenes et al., 2022). Entre las principales actividades en las cuales se pudiese emplear el hormigón poroso se encuentran las siguientes: Vías de tráfico liviano, zonas de parqueo, espacios deportivos entre otros (Ligia M. Velez, 2010).

Históricamente los datos bibliográficos registran el origen del concepto de hormigón poroso en Estados Unidos alrededor de los años 70 (Cervantes, 2020). La estructura de este hormigón se basa en un material con gran contenido de vacíos, conformado principalmente por grava cubierta de una delgada capa de pasta de cemento. Su configuración permite el paso del agua regresándola al suelo, procedimiento que no puede realizarse en la estructura de un hormigón convencional (Miralles, 2016).

Los materiales presentes en el diseño del hormigón poroso engloban tanto el cemento, el agua, aditivo y áridos con granulometrías señaladas por la norma (ASTM C33/C33M, 2018). De acuerdo con el (ACI 522R-10, 2010), guía empleada para el diseño de las mezclas, el contenido de vacíos oscila entre 18 a 35%. Es importante destacar, que un mayor contenido de poros representará bajas capacidades de carga, sin embargo, la velocidad de infiltración del agua será mayor (Cervantes, 2020).

La transmisión de cargas, en un hormigón poroso, u hormigón con escasa cantidad de áridos finos, se desarrolla de forma heterogénea, de acuerdo con los puntos de contacto entre las gravas, lo que en consecuencia ocasiona una distribución aleatoria de cargas (Cabello Sequera et al., 2015). Por ello, se puede afirmar que, una granulometría con altos porcentajes de partículas pasantes del tamiz N°4 brindará mayores resistencias, ya que el contacto entre partículas será mayor.

Los resultados de resistencia y permeabilidad de este tipo de hormigón varían en función de los materiales y proporciones consideradas, sin embargo, se han registrado rangos de parámetros, que permiten caracterizar un hormigón poroso. De esta manera, los autores (Leon & Rosero, 2016) consideran el peso unitario del hormigón poroso como una propiedad adicional, determinando valores que oscilan entre 1660 a 2000 kg/m³, adicionalmente, establecen rangos a compresión entre 2.8 a 28 MPa, mientras que, de acuerdo con (Tennis et al., 2004) el esfuerzo a flexión se encuentra entre 1 y 3.8 MPa.

Con respecto a la relación a/c, se recomienda en el informe (ACI 522R-10, 2010) que su valor se mantenga entre 0.26 y 0.40 con el fin de obtener resultados favorecedores de resistencia y permeabilidad. De esta manera, es importante determinar su influencia en la dosificación de mezclas. Por ejemplo, diversas investigaciones demuestran que la relación a/c no mantiene una misma correlación respecto al hormigón convencional, generando así una mayor resistencia con elevadas relaciones a/c, sin embargo, al realizar pruebas de permeabilidad una relación a/c baja alcanza mejores resultados (Spalvier et al., 2021). Por otro lado, el autor (Castro et al., 2009) identificó un particular comportamiento de la pasta del hormigón respecto a la relación a/c. Concluye que, valores elevados (0.41-0.44) generan escurrimiento de la pasta depositándose en el fondo de los moldes cilíndricos, por lo tanto, obstruye o taponan los poros de la muestra y afecta la permeabilidad. Además, reducir la relación a/c (<0.38) crea una distribución homogénea de pasta con resultados estables en sus pruebas mecánicas, aunque las resistencias son bajas y generan el desprendimiento de los áridos. No obstante, la tesis de pregrado elaborada por (León and Rosero 2016), registró una resistencia a compresión de 24.59 MPa y permeabilidad de 1.88mm/seg, empleando en el diseño el valor de relación a/c igual a 0.55 y gravas de un solo tamaño nominal (retenidas por el tamiz N°4). Por lo antes mencionado, el factor a/c es determinante en la trabajabilidad, resistencia y permeabilidad del concreto poroso.

La presente investigación pretende determinar la incidencia de la relación a/c en la resistencia a compresión, tracción indirecta y permeabilidad de especímenes cilíndricos de hormigón poroso fabricados con materiales de la zona austral de Ecuador. Se diseñan y fabrican tres tipos de mezclas con valores de a/c: 0.26, 0.34 y 0.42, estos valores fueron seleccionados en base al rango de relación a/c recomendado por el (ACI 522R-10, 2010). El árido cumple con los términos señalados por la normativa (ASTM C33/C33M, 2018) para árido N°8. En total se ensayaron 180 cilindros.

2. Materiales y métodos

El hormigón poroso caracterizado principalmente por la escasa cantidad de materiales finos, de acuerdo con la necesidad que se pretenda solventar, debe ser regulado tanto para tener una permeabilidad aceptable, de acuerdo con el rango establecido por el (ACI 522R-10, 2010) de 0,14 a 1,22 cm/s, como una resistencia adecuada. Por lo antes expuesto, las granulometrías para los especímenes a ser ensayados poseen gravas retenidas por los tamices: 3/8, N°4 y N°8, de acuerdo con la clasificación que se encuentra en la norma (ASTM C33/C33M, 2018), ya sea como agregado N°8 o N°67.

2.1 Materiales empleados en el diseño del hormigón poroso

Los cilindros de hormigón poroso se elaboraron a partir de una serie de materiales con propiedades y características específicas, que cumplen ciertos criterios de diseño, estos elementos son: áridos gruesos provenientes de la cantera Rookaazul CIA Ltda (agregado triturado), cemento Atenas tipo GU, el cual funciona como un conglomerante que otorga cohesión; el agua, que aporta consistencia y trabajabilidad a la mezcla. Además, de la incorporación del aditivo superplastificante MasterGlenium® 7952.

2.2 Agregados en el hormigón

2.2.1 Granulometría

Los áridos que se usaron en la dosificación de la mezcla fueron partículas de tamaños: 9.53mm (retenidas en el tamiz 3/8), 4.76mm (retenidos en el tamiz N°4) y partículas de 2.38mm (retenidos en el tamiz N°8). Su distribución granulométrica, según la norma (ASTM C136-05, 2011) se presenta en la Figura 1. Es necesario aclarar que la granulometría debe cumplir los límites de clasificación según la norma (ASTM C33/C33M, 2018).

2.2.2 Gravedad específica y Absorción.

Conocer la gravedad específica del árido es fundamental para la dosificación del hormigón, debido a que afecta en las proporciones del agregado, el peso del hormigón y sus resistencias. La gravedad específica se determinó mediante el procedimiento prescrito en la norma (ASTM C127, 2015). Su valor de gravedad específica es 2.63.

Otra característica esencial en la composición del hormigón poroso es determinar la absorción del árido, dado a su influencia en la relación a/c y contenido de agua. La absorción fue calculada a través de la norma (ASTM C127, 2015), el valor obtenido es de 1.87%.

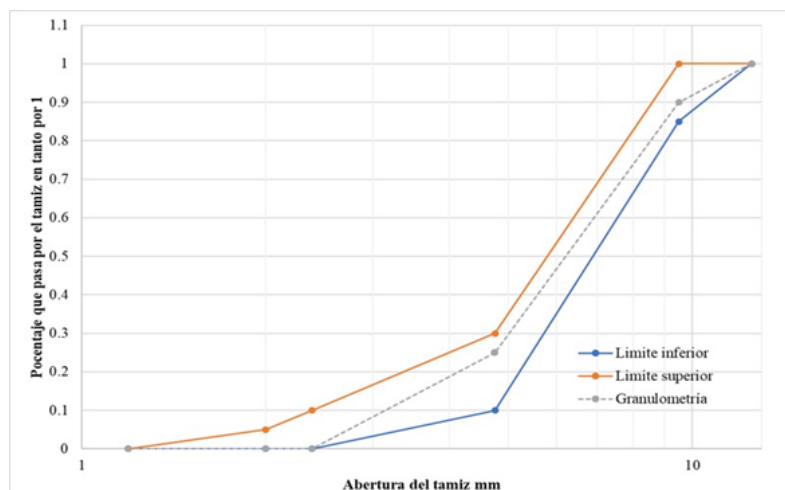


Figura 1 Curva granulométrica

2.2.3 Masa unitaria compactada.

La masa unitaria compactada del material, en otras palabras, la densidad del árido permite conocer características como la proporción del agregado y el volumen ocupado. Para determinar la masa unitaria se utilizó la norma (ASTM C29/29M, 2016), el resultado obtenido de este ensayo fue de: 1377.40 kg/m³.

2.2.4 Abrasión

Esta propiedad considera el desgaste del árido causado por fricción, determinar la abrasión del árido permite garantizar un hormigón poroso con buena resistencia, durabilidad y sobre todo basar el diseño en un control de calidad adecuado para su producción. Para su cálculo, se utilizó la norma (ASTM C131, 2010), el resultado del ensayo empleando el método B, con 11 esferas metálicas fue de 17.86%.

2.3 Cemento.

El Cemento empleado Atenas tipo GU (uso general) se encuentra proporcionado por la empresa Graitman, se trata de un material de composición inorgánica, el endurecimiento y la resistencia de este se debe a procesos de hidratación de silicatos de calcio además de otros componentes químicos (Labanda & Columba, 2020).

El cemento Portland se considera como uno de los productos con mayor utilización en la industria del concreto gracias a sus grandes ventajas mecánicas una vez ha alcanzado el estado endurecido. Al mezclarlo con agua inicia su proceso de hidratación la cual se debe a la reacción de sus componentes generando una pasta que permitirá darle cohesión a las partículas que conforman el concreto.

2.3.1 Ensayo de densidad del Cemento

La densidad del cemento es una propiedad empleada en el diseño de mezclas de hormigón, fue establecido mediante la normativa (ASTM C188, 2009), el valor obtenido fue de 2.89 g/cm³. La densidad promedio realizada en laboratorio se aproxima al valor sugerido por la ficha técnica del cemento Atenas.

2.4 Agua

El control de la cantidad del agua es una actividad fundamental en el diseño de hormigones ya que de esta depende varias propiedades del hormigón, como la trabajabilidad, asentamiento e hidratación del cemento, se encuentra representada en la relación a/c.

2.5 Aditivo

Los aditivos son componentes de una mezcla de hormigón que se emplean antes, durante y después del proceso de mezclado, su principal función es mejorar las propiedades ya sea de trabajabilidad, consistencia o desarrollo de la resistencia final del hormigón (León and Rosero 2016).

2.5.1 Aditivo MasterGlenium® 7952

El aditivo empleado en esta investigación fue el “aditivo MasterGlenium® 7952” se define como un reductor de agua de alto rango de nueva generación su funcionamiento se basa en tecnología de policarboxilatos, la dosificación sugerida en las recomendaciones del fabricante es de 0.2% a 1.2% del peso del cemento.

Entre sus beneficios se menciona una trabajabilidad adecuada con bajos niveles de agua, producción de mezclas de concreto cohesivas y sin segregación (Master Builders, 2021). Se encuentra normado bajo las condiciones de la (ASTM C494/C 494M, 2019) empleado para aditivos tipo A, reductores de agua y tipo F, aditivos reductores de agua de alto rango.

2.6 Metodología

El hormigón poroso caracterizado principalmente por la escasa cantidad de materiales finos, de acuerdo con la necesidad que se pretenda solventar, debe ser regulado tanto para tener una permeabilidad aceptable, de acuerdo con el rango establecido por el (ACI 522R-10, 2010) de 0,14 a 1,22 cm/s, como una resistencia adecuada. Por lo antes expuesto, las granulometrías para los especímenes a ser ensayados poseen gravas retenidas por los tamices: 3/8, N°4 y N°8, de acuerdo con la clasificación que se encuentra en la norma (ASTM C33/C33M, 2018), ya sea como agregado N°8 o N°67.

Previo al diseño, es necesario conocer las características de los agregados, por lo que se realizó ensayos de gravedad específica, pesos volumétricos, granulometrías, abrasión y absorción, presentados en la sección anterior. La dosificación de aditivo seleccionada es de 0.3% de la masa total del cemento, todos los ensayos se realizaron en el Laboratorio de Materiales de Construcción y Mecánica de Suelos de la Universidad Católica de Cuenca campus Azogues.

El método de compactación empleado fue sugerido por los autores (León & Rosero, 2016), y consiste en dosificar en tres capas, en cada una de ellas realizar 25 penetraciones de varilla normalizada (varilla de 30.5 cm de longitud y un diámetro de 9.5mm con punta redondeada), y 15 golpes externos con un mazo de hule, la metodología mencionada anteriormente generó los mejores resultados en ensayos realizados con anterioridad. Si bien se mantendrá constante la granulometría, aditivo y metodología de compactación, se realizarán variaciones en la relación agua/cemento (0.26, 0.34, 0.42). En la Tabla 1 se aprecia las dosificaciones realizadas en el presente estudio, los valores de agua y cemento varían de acuerdo con las ecuaciones (1) y (2) del informe (ACI 522R-10, 2010).

$$c = [(V_p / (1/d_c + w/cm))] \times d_a \quad (1)$$

$$w = c * (w/cm) \quad (2)$$

Donde:

c= cantidad de cemento

w= cantidad de agua

V_p= cantidad de pasta

d_c= densidad de concreto

w/cm= relación agua/cemento

d_a= densidad del agua

Tabla 1 Dosificaciones

a/c	0,26	0,34	0,42
<i>Cemento (kg)</i>	20,26	17,89	16,02
<i>Agua (kg)</i>	5,27	6,08	6,73
<i>Agregado (kg)</i>	76,69	76,69	76,69
<i>Aditivo (kg)</i>	0,06	0,05	0,05

Una vez que se haya dosificado los componentes del hormigón, se obtienen muestras cilíndricas, las cuales serán sujetas a ensayos de compresión, tracción indirecta y permeabilidad. El proceso se detalla a continuación:

2.6.1 Ensayos a compresión



Figura 2 Ensayo a compresión

El ensayo de compresión del hormigón implica, someter la muestra a una carga axial progresiva hasta producir falla o un patrón de fractura bien definido. El ensayo a compresión se considera como una prueba fundamental en la evaluación de la calidad de la muestra, su alta porosidad reduce el contacto entre partículas por lo que respecto al hormigón convencional su resistencia es inferior (Cardona, 2017). El desarrollo del ensayo se basó en la norma (NTE INEN 1573, 2010). Para el presente estudio, las dimensiones de los cilindros son de 100mm por 200mm y se emplearon neoprenos en los extremos de las muestras, los ensayos se realizan en 6 diferentes edades: 3, 7, 14, 21, 28 y 45 días para así apreciar su crecimiento respecto al tiempo.

2.6.2 Ensayos a tracción

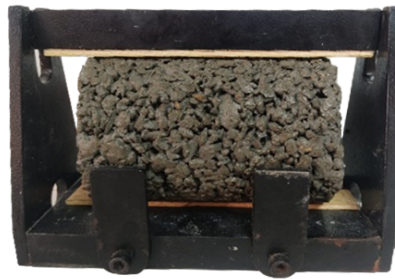


Figura 3 Ensayo a tracción indirecta

Esta prueba se basa en emplear una fuerza de compresión diametral en la longitud del espécimen manteniendo una velocidad dentro del rango normado hasta generar la falla, los esfuerzos generados son de tracción sobre el plano que contiene las cargas aplicadas y esfuerzos de compresión de gran magnitud en la zona cercana a la carga. Es importante calcular su resistencia a fuerzas de tracción para diseñar de manera segura los pavimentos u otras estructuras que requieran su aplicación.

El ensayo de resistencia a tracción se evalúa en base a la normativa (ASTM C496/496M, 2011). Del mismo modo, las pruebas se realizan en 6 diferentes edades: 3, 7, 14, 21, 28 y 45 días para así apreciar su crecimiento respecto al tiempo. De acuerdo con el manual "Diseño y control de mezclas de concreto" (Kosmatka et al., 2004) en el capítulo I se establece una relación entre la resistencia a la tracción de hormigón convencional frente a la compresión de este, la cual bordea un rango de valores entre 8% a 12%. No existe al momento una normativa validada y centrada en hormigón poroso, no obstante, para el pertinente ensayo se realizará bajo las especificaciones de un hormigón convencional.

2.6.3 Ensayo de permeabilidad



Figura 4 Ensayo de permeabilidad

Conocida como la factibilidad que posee un material para admitir el paso de un líquido por su estructura. El hormigón poroso posee esta propiedad como una de sus principales características, debido a la conexión interna de sus poros, se recomienda un aproximado de 15% como mínima cantidad de vacíos para lograr una filtración significativa (ACI 522R-10, 2010), sin embargo, al aumentar los vacíos la resistencia del hormigón a la compresión se ve reducida. Para la dosificación de las muestras de hormigón poroso del presente estudio se considera un porcentaje de vacíos del 20%.

2.6.4 Muestreo y validación de datos

Se elaboró un total de 180 cilindros la selección de la muestra se basa en el método no probabilístico, de los cuales, 90 se ensayaron a compresión y 54 cilindros a tracción indirecta, para estas pruebas se emplearon muestras de 200 x100 mm, mientras que para permeabilidad se emplearon un total de 36 probetas de 150 x 100 mm.

Para las pruebas mecánicas, se consideran como datos válidos aquellos datos que su resistencia no difiera en más de 10.6% de acuerdo con la recomendación emitida por la normativa (NTE INEN 1573, 2010). En las pruebas de permeabilidad se tomarán tres lecturas por cada cilindro, una vez obtenidos los tres tiempos se realizará un promedio antes de obtener el coeficiente de conductividad hidráulica.

3. Resultados

Mediante un análisis de 180 muestras ensayadas, se ha logrado obtener una visión integral de los fenómenos estudiados. Los resultados presentan deducciones y hallazgos significativos para una mayor comprensión y conocimiento de la incidencia del parámetro a/c en el comportamiento del hormigón poroso tanto a pruebas mecánicas como de permeabilidad. A continuación, se muestra los datos obtenidos y se discutirán sus implicaciones:

3.1 Comportamiento de la pasta.

Luego de realizar todas las dosificaciones se puede comprobar las afirmaciones realizadas por los autores en las secciones anteriores, si bien el comportamiento mecánico de los especímenes de mayor relación a/c presenta mejores resultados, el comportamiento de la pasta es desfavorable ya que tiende a acumularse en el inferior de los moldes como se aprecia en la Figura 5. En los apartados posteriores se visualiza la influencia de la pasta de cemento en los demás ensayos tanto mecánicos como de infiltración.

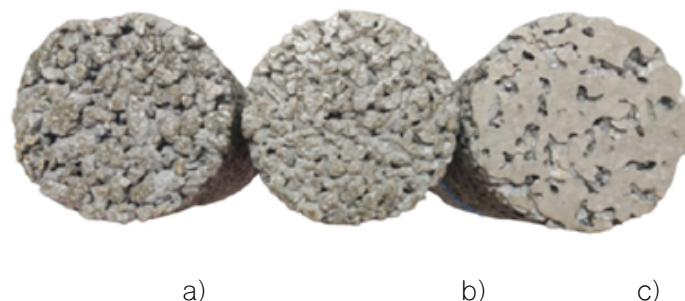


Figura 5 Comportamiento de la pasta de cemento: a) a/c 0.26. b) a/c 0.34. c) a/c 0.42

Una prueba para conocer la trabajabilidad de la mezcla consiste en la elaboración de una esfera de material en la mano inmediatamente salida la mezcla de la concretera. La relación a/c=0.26

permite la formación de la esfera y su apariencia es opaca y seca. Por otro lado, la dosificación con $a/c=0.34$ mantiene ciertas partículas juntas, mas no se forma una esfera completa. En cambio, con $a/c=0.42$ no es posible darle la forma deseada debido a la pasta líquida obtenida. Por lo tanto, al aumentar la relación a/c , la formación de dicha esfera se dificulta, haciendo que la misma se deshaga inmediatamente. En la Figura 6 se presenta el resultado de cada dosificación ante esta prueba.



Figura 6 Creación de la esfera de hormigón en estado fresco: (a) relación $a/c=0.26$, (b) relación $a/c=0.34$, (c) relación $a/c=0.42$.

La densidad del hormigón se determinó mediante la normativa ASTM C138, la cual varía ya sea por la cantidad, densidad relativa y tamaño máximo de los agregados, los espacios vacíos (porosidad) así como también por la relación a/c (Vallejo & Amaguaya, 2016). Este cambio se debe a que un alto contenido de pasta ingresa con facilidad entre los poros de los cilindros, por lo que, la masa del testigo aumenta, manteniendo un mismo volumen como se aprecia en la Tabla 2. Debido al aumento en la densidad por la presencia de mayor cantidad de pasta, se esperan mejores resultados en las pruebas mecánicas.

Tabla 2 Densidad promedio según la relación a/c

Relación a/c	0.26	0.34	0.42
Densidad del hormigón poroso (kg/m^3)	1791.15	1860.41	1929.96

3.2 Resistencia a la compresión

Los resultados revelan que la capacidad de carga de las muestras varía notablemente según se altere la relación a/c en el diseño. La principal peculiaridad fue observar un comportamiento inverso en cuanto a la relación a/c y su efecto en la resistencia en un hormigón tradicional. El concreto poroso indica que, a mayor relación a/c su capacidad de carga aumenta. Se identificó que la relación a/c de 0.42 proporciona el valor más alto en los especímenes analizados, siendo de 15.88 MPa. Los resultados alcanzados en esta prueba se resumen en la Figura 7, adicionalmente en la Tabla 3 se presenta los valores de carga obtenidos en cada día de ensayo.

En primera instancia, para la resistencia máxima que alcanza las muestras de hormigón (100%) se toma como referencia los resultados alcanzados a los 28 días, teniendo como fundamento el comportamiento de un hormigón tradicional. Cabe recalcar que, a los 45 días, a pesar de transcurrir

un periodo de tiempo considerable, se observa un crecimiento mínimo en la curva de resistencia, lo cual corrobora el planteamiento anterior.

De la misma manera, se observa que, el mayor crecimiento se genera en los primeros tres días, en los cuales la resistencia obtenida por las muestras alcanza un valor cercano al 50%, el cual es superior al valor obtenido en hormigones convencionales que se establece en un 40% de acuerdo con (Manuel Valcuende Payá et al., 2011) Los porcentajes para los demás días de ensayo fueron resumidos y se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3 Resultados alcanzados en el ensayo a compresión

Días	Relación a/c 0.26		Relación a/c 0.34		Relación a/c 0.42	
	Compresión	Crecimiento porcentual	Compresión	Crecimiento porcentual	Compresión	Crecimiento porcentual
3	4.74	51.25%	5.71	46.44%	9.21	59.81%
7	6.43	69.57%	7.35	59.72%	10.51	68.30%
14	7.22	78.05%	9.88	80.31%	12.14	78.89%
21	8.23	89.02%	11.42	92.83%	14.31	92.96%
28	9.25	100.00%	12.31	100.00%	15.39	100.00%
45	9.76	105.50%	12.88	104.66%	15.88	103.18%

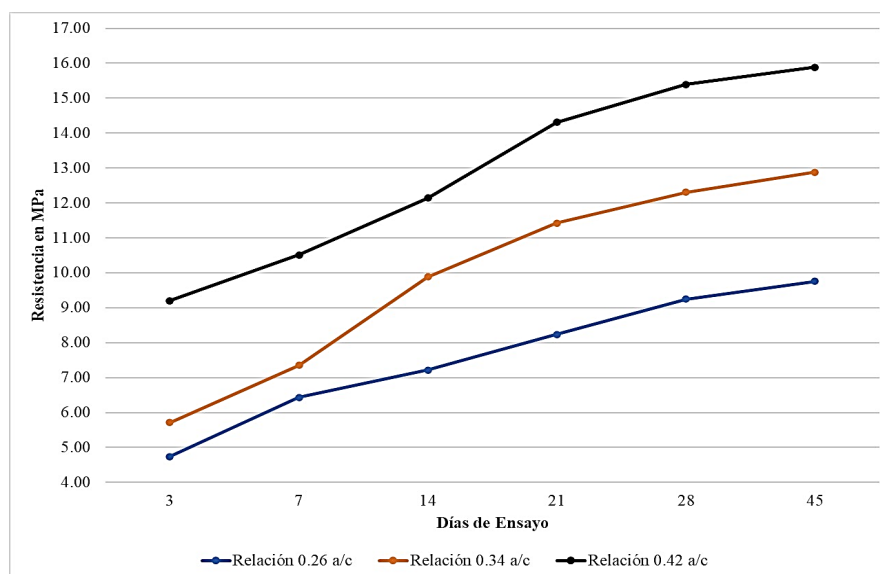


Figura 7 Variación en la resistencia a compresión según los días de ensayo

3.3 Resistencia a la tracción indirecta.

En esta prueba de carga, se conoce como premisa que la resistencia a tracción de los cilindros resulta ser proporcional a la resistencia a compresión axial. Por lo tanto, se determinó que al emplear una relación a/c=0.42 genera el valor máximo en ambas pruebas mecánicas. El mayor valor alcanzado en pruebas a tracción fue de 2.20MPa, las curvas de crecimiento se presentan en la Figura 8 mientras que los valores alcanzados y su crecimiento porcentual se aprecian en la Tabla 4.

Tabla 4 Resultados alcanzados en el ensayo a tracción indirecta

Días	a/c 0.26		a/c 0.34		a/c 0.42	
	Tracción	Crecimiento Porcentual	Tracción	Crecimiento Porcentual	Tracción	Crecimiento Porcentual
3	0.92	51.60%	1.08	55.15%	1.53	71.41%
7	1.17	65.55%	1.33	67.53%	1.70	79.37%
14	1.30	73.07%	1.46	74.34%	1.84	85.90%
21	1.51	84.65%	1.59	81.00%	2.04	95.11%
28	1.78	100.00%	1.97	100.00%	2.14	100.00%
45	1.81	101.46%	2.01	102.37%	2.20	102.54%

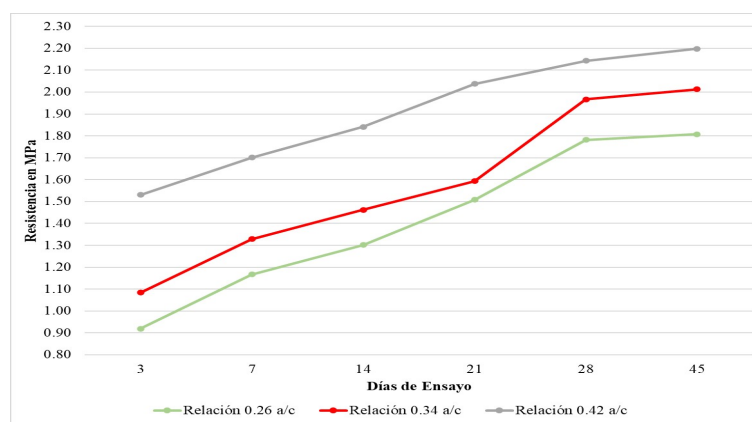


Figura 8 Variación en la resistencia a tracción directa según días de ensayo.

Al realizar un análisis comparativo de los resultados mecánicos, se puede afirmar que la resistencia a tracción abarca un intervalo del 13% al 19% del valor de la capacidad a compresión. La variación entre compresión y tracción se aprecia en la Tabla 5. Mientras que en la Figura 9, se presenta el conjunto de puntos obtenidos al graficar las resistencias alcanzadas en los ensayos con las tres relaciones a/c analizadas en el presente estudio.

Tabla 5 Relación porcentual entre tracción y compresión

Relación a/c	Resistencia a compresión (MPa)	Resistencia a tracción (MPa)	Porcentaje tracción / compresión
0.26	9.76	1.81	18.52%
0.34	12.88	2.01	15.63%
0.42	15.88	2.20	13.84%

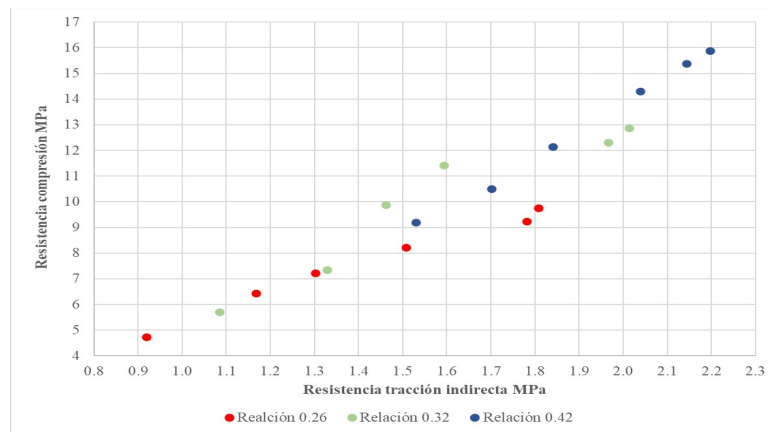


Figura 9 Relación entre tracción y compresión

3.4 Análisis de permeabilidad

Un hormigón poroso busca recuperar el agua proveniente de las lluvias generando una infiltración al subsuelo ya sea en zonas peatonales, parques, plazas o cualquier estructura en la que se pudiese aplicar este material. La infiltración favorece a la recarga de las aguas subterráneas, además de evitar la presencia de agua superficial y las posibles escorrentías o inundaciones (Marroquín & Trejo, 2019). La permeabilidad es la principal característica que diferencia al hormigón poroso de otros materiales, se encuentra afectada por el contenido de los vacíos de los cilindros (Díaz et al., 2020).

Previo al cálculo del coeficiente de conductividad hidráulica k , es necesario determinar la constante A , que depende de las medidas del permeámetro. Estos parámetros obedecen a la ley de Darcy y a la metodología presentada por (Cruz & Arana, 2021). Los valores de A y k , se determinan de acuerdo con (3) y (4):

$$A = L * \frac{A_1}{A_2} * \ln\left(\frac{h_1}{h_2}\right) \quad (3)$$

$$k = \frac{A}{t} \quad (4)$$

En estas ecuaciones la variable L , representa la longitud de la muestra de hormigón poroso (150mm), A_1 es el área del tubo acrílico del permeámetro (diámetro interno = 99.2 mm), A_2 es la sección de la muestra de hormigón poroso (diámetro = 100mm), h_1 y h_2 son las alturas de inicio y fin de la carga de agua respectivamente (300 mm a 10 mm), finalmente t , será el tiempo que le tome al agua atravesar esta altura. En este caso, la constante $A=502.05\text{mm}$. Para obtener el coeficiente hidráulico de permeabilidad se deberá dividir dicho coeficiente para el tiempo de duración del ensayo (tiempo promedio de 3 ensayos realizados).

La velocidad de infiltración dependerá tanto del tamaño de los áridos empleados en el diseño y la densidad de la mezcla. La permeabilidad en las diferentes dosificaciones elaboradas en el presente estudio se muestra en la Tabla 6, la relación a/c de 0.26 resultó ser la relación con mejor permeabilidad superando en un 270% a la relación a/c de 0.42 y en 187% a la relación 0.34.

La velocidad de infiltración alta se debe a la facilidad de ingreso del agua en la estructura del espécimen, es necesario aclarar que la dosificación con a/c de 0.26 posee una reducida cantidad de pasta por lo cual los vacíos internos se podían conectar de manera más eficiente registrando así un valor máximo de coeficiente de conductividad hidráulica de 1.27 cm/s.

Tabla 6 Variación del coeficiente de conductividad hidráulica “k”

Relación a/c	Valor k (cm/s)	Variación porcentual
0.26	1.27	-
0.34	0.68	187%
0.42	0.47	270%

Al igual que el autor (Cardona, 2017), en el presente estudio se le atribuye la variación en la permeabilidad al porcentaje de vacíos del cilindro y la densidad del mismo, factores que varían según la relación agua/cemento, permitiendo establecer una relación inversamente proporcional entre estas dos variables como se aprecia en la Figura 10.

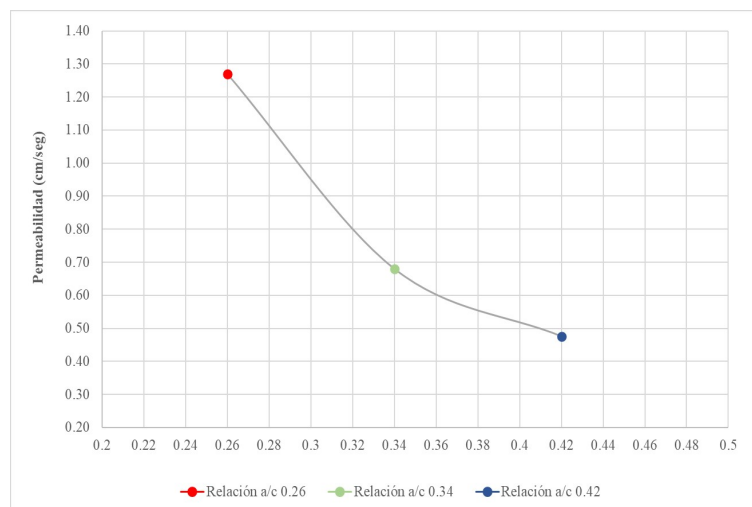


Figura 10 Variación entre la permeabilidad y la relación a/c

3.5 Comparativa de resultados con el informe ACI-522R-10

El informe sobre hormigón poroso reportado por el comité (ACI 522R-10, 2010), brinda datos técnicos relacionados con el uso de este material como mecanismos de diseño, elementos que lo conforman, características, pruebas e inspección. En el capítulo 5 del informe, se detallan las propiedades de este hormigón, las cuales dependen principalmente de su porosidad. Al evaluar la gráfica 5.2 titulada: “Relación entre el peso unitario y la resistencia a la compresión del hormigón permeable” mediante una línea de tendencia exponencial con un R2 de 0.90 es posible realizar una comparación entre los cilindros ensayados en el presente artículo y los cilindros reportados por el comité del ACI, alcanzando los resultados mostrados en la Tabla 7.

Tabla 7 Comparativa de resultados de ensayos mecánicos con el informe ACI-522R-10

a/c	Densidad del hormigón (kg/m ³)	Resistencia a la compresión calculada (MPa)	Resistencia a la compresión ACI 522 (MPa)	Variación porcentual
0.26	1791.15	9.25	9.115	1.44%
0.34	1860.41	12.31	11.41	7.28%
0.42	1929.96	15.39	14.25	7.42%

En el resumen de resultados presentado en la Tabla 7, se puede apreciar que los cilindros con mayores densidades generan mejores resistencias, obteniendo los resultados más favorables con una relación a/c elevada tanto en el presente artículo como en las pruebas mecánicas desarrolladas por el ACI, la variación entre los resultados obtenidos es inferior al 8% por lo que es posible concluir que el comportamiento de las dos muestras es similar.

3.6 Tipos de falla

La normativa empleada para ensayos a compresión (NTE INEN 1573, 2010) establece en el anexo A, seis esquemas típicos de fractura para concreto convencional, sin embargo, se los toma como referencia para comparar con las fallas generadas en los especímenes de concreto como se aprecia en la Figura 11. Los ensayos se realizaron con ayuda de neoprenos y la ocurrencia de los diferentes tipos de fallas se encuentran registrados en la Figura 12.

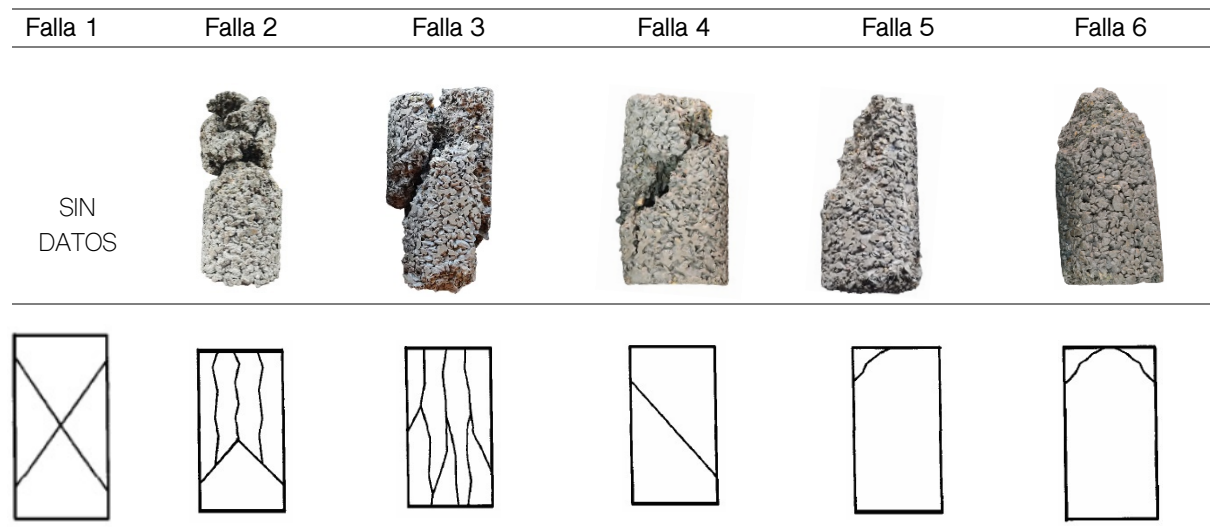


Figura 11 Esquemas de falla de cilindros a compresión

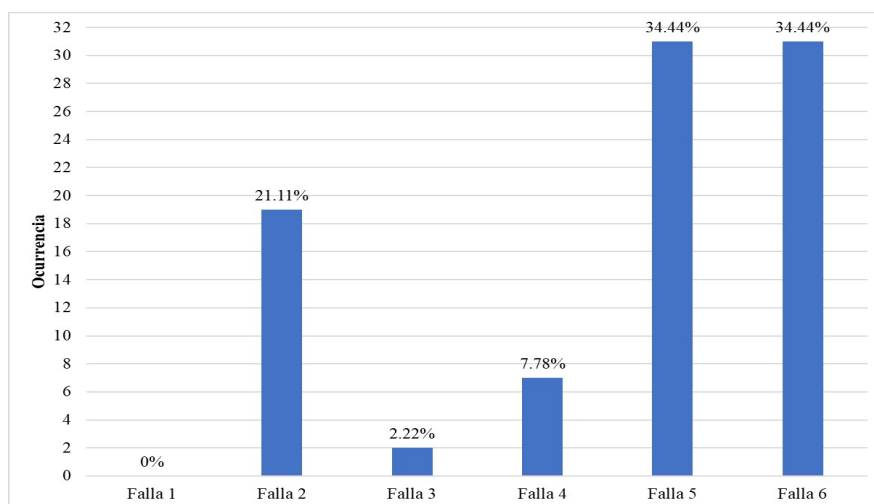


Figura 12 Porcentaje de ocurrencia de fallas a compresión

Se evidencia que los esquemas tipo 5 (34.44%) y tipo 6 (34.44%) son predominantes en el ensayo, en estas fallas se genera una fractura en los extremos superiores del cilindro, en un menor porcentaje (21.11%) se registran fallas tipo 2, caracterizadas por generar un cono en el cilindro

luego de su rotura. Respecto al ensayo a tracción indirecta los cilindros mostraron una falla en el eje longitudinal de la probeta en un 93.33% de los casos, mientras que en el 6.67% restante el espécimen se fracturó en 3 porciones como se observa en la Figura 13.

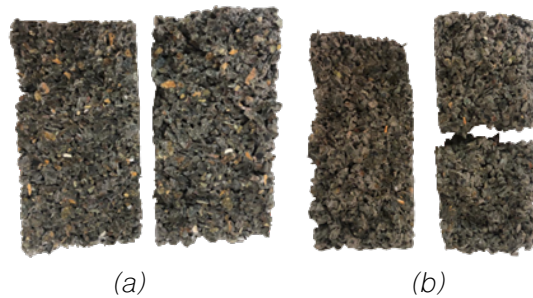


Figura 13 Falla a tracción indirecta: (a) 2 porciones longitudinales, (b) 3 porciones

4. Discusión

El comportamiento del hormigón permeable se manifestó de manera inversa al del hormigón convencional, de modo que relaciones a/c elevadas condujeron a mayores resistencias. De igual manera, se determinó que la resistencia es directamente proporcional a la densidad del cilindro, mientras que en la prueba de infiltración se esperaría lógicamente una mayor permeabilidad con una menor relación a/c. Al concluir el estudio, se llegó a un consenso general de que una relación de 0.42 proporciona un equilibrio adecuado entre las dos características analizadas. Considerando la posibilidad de investigaciones futuras sobre el tema, se acordó que sería recomendable variar la granulometría del árido y explorar diferentes valores para la relación a/c.

5. Conclusiones y comentarios

El hormigón poroso representa una alternativa viable para solucionar los problemas de manejo de aguas superficiales que afligen a las comunidades modernas, sin embargo, se requiere ampliar las investigaciones referentes a su diseño y aplicación, al finalizar el presente estudio experimental es posible llegar a las siguientes conclusiones:

1. Las propiedades mecánicas en el hormigón poroso varían principalmente por la densidad del cilindro (obteniendo mayores resistencias con muestras de densidades elevadas), los resultados más favorables fueron obtenidos con las muestras dosificados con la relación a/c de 0.42, los cuales registran una densidad de 1929.96 kg/m³; la resistencia obtenida a compresión es de 15.88 MPa, mientras que a tracción indirecta 2.2 MPa.
2. La curva de crecimiento a compresión de los cilindros ensayados muestra un mayor crecimiento en los 3 primeros días de curado, en los cuales se evidencia un aumento de aproximadamente el 50% con respecto a la resistencia máxima.
3. Al finalizar los ensayos mecánicos se determinó que la carga registrada en las pruebas de tracción indirecta corresponde a un rango de entre el 13% y 19% de la carga de compresión. Los patrones de falla representativos a compresión fueron debido a fracturas en los extremos superiores de los cilindros (fallas 5 y 6) mientras que a tracción indirecta predominó la falla en 2 porciones, en el eje longitudinal del cilindro.
4. Contrario a los resultados demostrados en las propiedades mecánicas, los valores de infiltración en el hormigón poroso exponen un comportamiento inverso, obteniendo mejores efectos al reducir la relación a/c a 0.26, consiguiendo así una permeabilidad de 1.27 cm/s. Las dosificaciones realizadas con una elevada relación a/c mostraron un notable

escurrimiento de la pasta al fondo del cilindro generando mezclas heterogéneas verticalmente, este escurrimiento ocasiona la obstrucción de los vacíos lo cual deriva en permeabilidades bajas.

5. Al realizar una comparación entre los cilindros ensayados por el ACI-552R-10 y los cilindros elaborados, empleando la gráfica 5.2 del informe, la menor diferencia se encuentra con la relación $a/c=0.26$, mientras que con $a/c=0.34$ y $a/c=0.42$ la variación es de aproximadamente el 7%. Por lo tanto, las densidades y resistencias a compresión estimadas en laboratorio generan resistencias similares a las obtenidos por el ACI.
6. Al finalizar el presente estudio, es posible mencionar que, la relación a/c que presenta un adecuado balance entre las propiedades estudiadas es 0.42, esta dosificación permite una infiltración favorable, además de poseer la mayor capacidad de carga de las dosificaciones analizadas, sin embargo, una vez culminada la revisión bibliográfica y el estudio experimental, es aconsejable emplear granulometrías con una mayor presencia de materiales finos, a fin de controlar el escurrimiento de la pasta y aumentar el contacto entre partículas.

Contribución de los autores: La aportación de los autores del presente artículo es un reflejo de una adecuada planificación y colaboración. Dos estudiantes (Marco Molina, David Reyes), quienes desempeñaron un papel fundamental en la ejecución de experimentos de laboratorio, planificación de actividades, gestión y uso de materiales, análisis de datos y redacción; demostrando un compromiso ético con cada etapa del proceso investigativo. Por otro lado, la contribución de los docentes (Ing. Pilar Naspud, Ing. Paul Illescas), se centró en la búsqueda bibliográfica, revisión y validación de datos, así como la rigurosa tarea de mejorar constantemente la redacción; aportando una perspectiva en base a la experiencia la cual fortaleció la calidad y credibilidad del trabajo. Así, esta sinergia entre estudiantes y docentes ha dado lugar a un artículo que combina la experiencia práctica con el conocimiento académico.

Financiamiento: Los autores financiaron a integridad el estudio.

Conflictos de interés: Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

6. Referencias

1. ACI 522R-10. (2010). Report on Pervious concrete ACI 522. American Concrete Institute.
2. ASTM C29/29M. (2016). ASTM C29/29M Standard Test Method for Bulk Density ("Unit Weight") and Voids in Aggregate.
3. ASTM C33/C33M. (2018). Standard Specification for Concrete Aggregates. American Society for Testing and Materials.
4. ASTM C127. (2015). Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate. American Society for Testing and Materials.
5. ASTM C131. (2010). Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine. American Society for Testing and Materials.
6. ASTM C136-05. (2011). Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates. American Society for Testing and Materials.
7. ASTM C188. (2009). Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement. American Society for Testing and Materials.
8. ASTM C494/C 494M. (2019). Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete. American Society for Testing and Materials.
9. ASTM C496/496M. (2011). Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens. American Society for Testing and Materials.

10. Cabello Sequera, S., Campuzano Vera, L., Espinoza Correa, J., & Sánchez Mendieta, C. (2015). Concreto poroso: Constitución, Variables influyentes y protocolos para su caracterización. *Cumbres*, 64–69.
11. Cardona, H. A. (2017). Propiedades Mecánicas y de filtración en hormigones permeables con cemento portland e hidráulicos.
12. Castro, J., De Solminihac, H., Videla, C., & Fernández, B. (2009). Estudio de dosificaciones en laboratorio para pavimentos porosos de hormigón. In *Revista Ingeniería de Construcción* (Vol. 24, Issue 3). www.ing.puc.cl/ric
13. Cervantes, A. F. (2020). Estudio de factibilidad del concreto permeable y su posible aplicación en la ciudad de Barranquilla, Colombia. Universidad de la Costa.
14. Cruz, F. H., & Arana, C. F. (2021). Evaluación de la resistencia mecánica de un concreto permeable ordinario frente a concretos permeables elaborados con un aditivo superplastificante y relaciones a/c menores para uso en pavimentos urbanos; Arequipa-2021.
15. Díaz, A., Herrera, T., & Marrero Ignacio. (2020). Estudio de las características del hormigón permeable y su implementación en el Uruguay. Universidad de la república.
16. Kosmatka, S. H., Kerkhoff, B., & Panarese, W. C. (2004). *Diseño y control de mezclas de concreto* (Portland Cement Association, Ed.; 1. Edición).
17. Labanda, L. H., & Columba, E. S. (2020). Evaluación de la sensibilidad de los aditivos Sika, en hormigones y morteros producidos con cemento GU, LC3, LC2 y humo de sílice.
18. Leon, C. A., & Rosero, G. E. (2016). Optimización del diseño de una mezcla de hormigón permeable a partir de tres distintas graduaciones. Universidad Central del Ecuador.
19. Ligia M. Velez. (2010). Permeabilidad y porosidad del concreto. *Rev. Tecno Lógicas*, 25, 169–187.
20. Manuel Valcuende Payá, Empar Marco Serrano, Rafael Jardón Giner, & Alejandro Gil Andrés. (2011). Evolución de la resistencia del hormigón con la edad y la temperatura. Universidad Politécnica de Valencia.
21. Marroquín, M. B., & Trejo, J. Y. (2019). Diseño de hormigón permeable para el aprovechamiento de agua lluvia en superficies de uso peatonal. Universidad Central del Ecuador.
22. Master Builders. (2021). MasterGlenium 7952. www.master-builders-solutions.com/es-co
23. Miralles, R. X. (2016). Estudio de la influencia de la compactación en la permeabilidad y la resistencia a compresión de hormigones porosos. Universidad Politécnica de Cataluña.
24. NTE INEN 1573. (2010). Hormigón de cemento hidráulico, determinación de la resistencia a la ocmpresión de especímenes cilíndricos de hormigón de cemento hidráulico. Instituto Ecuatoriano de Normalización.
25. Spalvier, A., Díaz, A., Marrero, I., Baliosian, T., Pielarisi, R., & Segura, L. (2021). Recomendaciones sobre Pavimentos de Hormigón Permeable.
26. Tennis, P. D., Leming, M. L., & Akers, D. J. (2004). *Pervious Concrete Pavements*. www.nrmca.org
27. Toxement. (2020). Guía de especificación concreto poroso o concreto permeable.
28. Vallejo, M. A., & Amaguaya, V. J. (2016). Selección del material óptimo para el diseño de concreto permeable utilizando agregados de dos minas de la provincia de Chimborazo y el cemento Portland Tipo I, en relación a la obtención de mayor permeabilidad y resisitencia. Universidad Nacional de Chimborazo.
29. Ximenes, J., Jesus, C., Aguiar, J., & Pais, J. (2022). Diseño de mezclas y propiedades físicas y mecánicas de hormigones permeables. *Materiales de Construcción*, 72(348). <https://doi.org/10.3989/mc.2022.292722>



© 2024 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>