

EFFECTO DEL CONTENIDO PASTA Y AGREGADOS FINOS SOBRE LAS PROPIEDADES DEL HORMIGÓN DRENANTE

EFFECT OF PAST AND FINE AGGREGATE CONTENT ON PERVIOUS CONCRETE PROPERTIES

FOGLIATTI, Fernando Luis; CARRASCO, María Fernanda; BELTRAMINI, Loreley Bettina; DEFAGOT, Carlos Antonio

Fernando Luis FOGLIATTI

ffogliatti@frsf.utn.edu.ar

Universidad Tecnológica Nacional, Argentina

María Fernanda CARRASCO

mcarrasco@frsf.utn.edu.ar

Universidad Tecnológica Nacional, Argentina

Loreley Bettina BELTRAMINI

lbeltramini@frsf.utn.edu.ar

Universidad Tecnológica Nacional, Argentina

Carlos Antonio DEFAGOT cdefagot@frsf.utn.edu.ar

Universidad Tecnológica Nacional, Argentina

Tecnología y Ciencia

Universidad Tecnológica Nacional, Argentina

ISSN: 1666-6917

ISSN-e: 1666-6933

Periodicidad: Cuatrimestral

núm. 46, 2023

nsalvi1981@gmail.com

Recepción: 10 Febrero 2023

Aprobación: 21 Abril 2023

URL: <http://portal.amelica.org/amei/journal/748/7483854002/>

DOI: <https://doi.org/10.33414/rtyc.46.18-40.2023>



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0 Internacional.

Resumen: Se evaluaron hormigones drenantes, elaborados con cemento portland compuesto, agregados gruesos graníticos, contenidos variables de agregado fino entre 0 y 16 % y de pasta desde 15 % a 25 % e incorporación de aditivos químicos.

En estado fresco se evaluó la consistencia mediante el tronco de cono de Abrams y la prueba Hand-Squeeze. En estado endurecido, la resistencia a compresión a 7 y 28 días, la densidad seca aparente, la absorción, el contenido de vacíos, la permeabilidad y el espesor de la pasta circundante al agregado grueso.

Se estudió la distribución de tamaño de los poros internos y se realizó una comparación entre la porosidad medida de forma convencional y por medio de análisis de imágenes.

La resistencia aumentó con el contenido de finos, con el incremento del contenido de pasta y con el espesor de pasta y simultáneamente, se redujeron el contenido de vacíos y la permeabilidad.

Palabras clave: hormigones drenantes, contenido de finos, contenido de pasta, análisis de imágenes, propiedades.

Abstract: Pervious concretes were evaluated, prepared with blended portland cement, granitic coarse aggregates, variable contents of fine aggregate between 0 and 16 % and cement paste from 15 % to 25 % and incorporation of chemical admixtures.

In the fresh state, the consistency was evaluated using the Abrams slump test and the Hand-Squeeze test. In the hardened state, were evaluated compressive strength at 7 and 28 days, apparent dry density, water absorption, void content, permeability and thickness of the cement paste surrounding the coarse aggregate.

The size distribution of the internal pores was studied and a comparison is made between the porosity measured conventionally and by means of image analysis.

Strength increased with fines content, with increasing paste content and with paste thickness, and simultaneously, void content and permeability decreased.

Keywords: pervious concrete, fine aggregate content, cement paste content, image analysis, properties.

INTRODUCCIÓN

Con el aumento de la urbanización, ocurre una gradual impermeabilización del suelo, debido a la construcción de edificios, calles y rutas pavimentadas. El crecimiento urbano y la demanda de vías rápidas y seguras de tránsito provocan una ocupación significativa de la superficie de las regiones urbanizadas, en las cuales se recubre el suelo natural con capacidad de infiltración del agua por otros materiales menos permeables.

El crecimiento incontrolado de la urbanización, disminuye notoriamente la capacidad de recarga natural de agua en los terrenos, e incrementa de forma considerable el volumen y el caudal de escurrimiento superficial, aumentando el riesgo de provocar inundaciones en los sectores más bajos de las ciudades (Sonebi et al, 2016; Barišić et al, 2017). Frente a esta tendencia, se han comenzado a aplicar diversas alternativas constructivas tendientes a incrementar la capacidad de infiltración en los solados y otras superficies, implementándose terrazas verdes (Berardi et al, 2014), solados construidos con losetas cribadas y pavimentos drenantes (Castro Espinosa, 2011; Singh et al, 2020).

Según Tennis et al. (2004), los hormigones porosos se elaboran con agregados gruesos uniformes, con mínimos contenidos de agregados finos y una cantidad controlada de pasta de cemento, que conforman una estructura permeable, escurriendo el agua a través de vacíos interconectados que generalmente alcanzan valores entre el 15 a 25 %, lo que permite el paso de 120 a 230 litros/m., con una tasa de percolación de 3,4 mm/s (200 l/m²/min) o mayor.

Recientemente, el hormigón poroso ha atraído un renovado interés entre los profesionales, contratistas y los ámbitos académicos debido a sus impactos ambientales positivos. Los beneficios de la aplicación de este hormigón se pueden resumir en: reducción del escurrimiento superficial de aguas pluviales, recarga de capas freáticas y acuíferos, minimización de inundaciones repentinas y del agua estancada, así como la mitigación de contaminantes superficiales (Rautenberg et al, 2021). Existen registros de experiencias recientes en varios países de la región, como Brasil (Holtz, 2011), Chile (Castro et al, 2009), Uruguay (Spalvier et al, 2021) y en nuestro país (Hernández et al, 2008; Garat et al, 2019; Weber et al, 2015) donde se estudiaron métodos de diseño de mezclas y se realizaron análisis de dosificaciones de hormigón poroso.

Además, se encuentran otros usos, como la construcción de reservorios pluviales que permiten regular los caudales de vertidos (Aguirre et al, 2022; Miraglio et al, 2021), solados permeables modulares, aceras, terrazas invertidas, barreras acústicas, etc.

Esto exige que se determinen los parámetros que influyen en las propiedades finales del hormigón drenante para lograr mejores dosificaciones. Las dimensiones de los poros, el volumen de pasta, la relación agua-cemento y la forma, textura y distribución de los agregados, son algunos de los parámetros que dictan las características del material. El contenido de cemento empleado influye en el espesor de la capa que recubre a los agregados, que a su vez afecta

la porosidad y las propiedades mecánicas de estos hormigones. La capacidad de infiltración de los hormigones drenantes está determinada por las características de la estructura de poros tales como el tamaño de los agregados gruesos, volumen de vacíos, tamaño de poros, distribución de poros y contenido de cemento (ACI, 2010). Como indicaron Larrad y Belloc (1997), la resistencia de estos hormigones queda determinada por las propiedades del mortero, del agregado grueso y de la interfase. Debido a que la pasta de cemento de estos hormigones es muy delgada para aglomerar a todos los materiales componentes, la falla del hormigón drenante tiende a ser en la interfase entre el ligante y los agregados, por lo cual las resistencias asociadas tienden a ser reducidas (Yang y Jiang, 2003).

En el hormigón drenante se observa una capa de pasta que rodea a los agregados, formando meniscos que unen los agregados adyacentes confiriéndole al conjunto resistencia mecánica y manteniendo aún espacios vacíos en forma de poros macroscópicos. Como estos poros pueden o no estar interconectados se ha definido una “porosidad efectiva” la cual describe la proporción del total de vacíos por la cual el agua puede circular (Torres et al, 2015). En concordancia con lo anterior, Montes et al (2005) destacan que no todos los poros permiten el flujo a través de ellos y por lo tanto, a esta fracción no accesible se la define como “porosidad inactiva”.

En este artículo se exploran las propiedades de mezclas elaboradas con diferentes contenidos de agregado fino y de pasta con el objetivo de optimizar el diseño de estas estructuras y de posibilitar la aplicación en elementos premoldeados. Paralelamente, se determina mediante el análisis de secciones de hormigones drenantes el espesor de la capa de pasta, los tamaños y la distribución de la porosidad “efectiva” y “no efectiva”, a fin de establecer una relación entre las propiedades físicas y mecánicas de diferentes muestras con las propiedades resultantes.

MATERIALES Y METODOS

Materiales

Se empleó piedra partida granítica 3-9 mm, con peso específico en condición de saturado y superficie seca (SSS) de 2,79 g/cm., absorción 0.70 % (IRAM 1533), y densidad a granel compactada de 1459 kg/m. (IRAM 1548). La curva granulométrica del agregado grueso empleado se muestra en la Figura 1. Como agregado fino se utilizó arena de río, con peso específico en condición SSS de 2,65 g/cm. y absorción 0,18 % (IRAM 1520). La curva granulométrica del agregado fino empleado se muestra en la Figura 2.

Se empleó cemento portland compuesto de clase resistente 40 (CPC-40 – IRAM 50000). La procedencia del cemento empleado es Córdoba (Argentina) y su densidad absoluta, determinada de acuerdo a la norma IRAM 1624, es 2,98 g/cm³.

Como agua de mezclado, se utilizó agua potable de red, que cumple con los requisitos establecidos en el reglamento CIRSOC 201 y en la Norma IRAM 1601.

El aditivo químico utilizado fue un reductor de agua de alto rango consistente en una solución acuosa de sulfonato de naftaleno modificado con una densidad de 1,180 a 1,210 g/cm. y residuo sólido de 34,58 g/100 g.

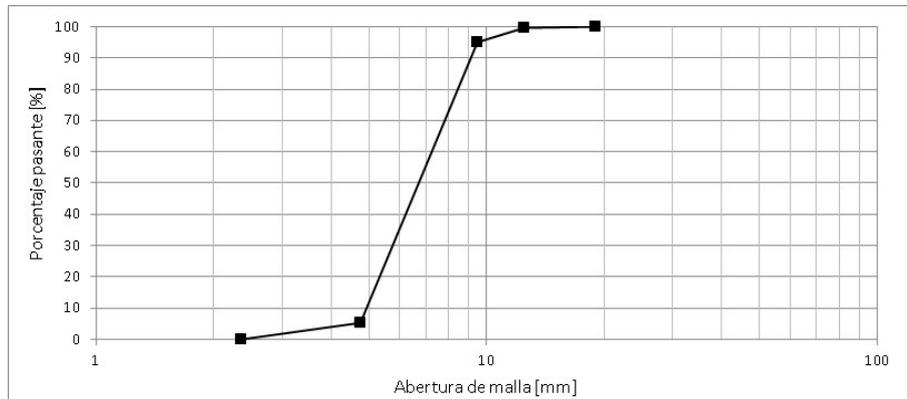


Figura 1:
Granulometría del agregado grueso

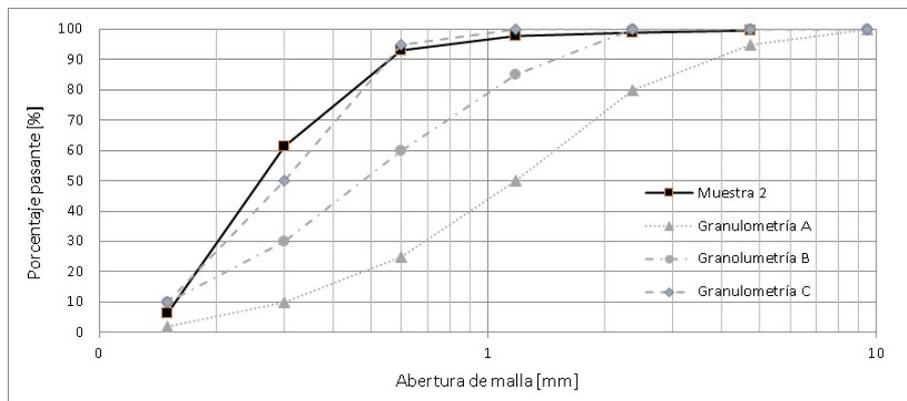


Figura 2
Granulometría del agregado fino.

Mezclas estudiadas

Las mezclas se dosificaron aplicando el método propuesto en “ACI-522.1 Specification for Pervious Concrete Pavement” establecido por el American Concrete Institute (ACI, 2013) con el objetivo de lograr un contenido de vacíos de 20 %. Las dosificaciones evaluadas se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1
Dosificaciones evaluadas

Dosificación	Volumen de pasta (%)	Porcentaje de finos (%)	Relación Agua /Cemento (A/C)	Cemento (kg/m ³)	Agua (kg/m ³)	Agregado Grueso (PG 3-9) (kg/m ³)	Agregado Fino (kg/m ³)	Aditivo químico (kg/m ³)
A	15	0	0.35	220	77	1587	0	0
B	15	6	0.35	217	76	1529	92	0
C	15	10	0.35	215	75	1491	149	0
D	15	12	0.35	214	75	1465	176	0
E	15	14	0.35	213	75	1439	202	0
F	15	16	0.35	212	74	1414	226	0
G	20	0	0.35	293	102	1587	0	0
H	20	6	0.35	289	101	1529	92	0
I	20	10	0.35	287	100	1491	149	0
J	20	12	0.35	286	100	1465	176	0
K	20	14	0.35	284	100	1439	202	0
L	20	16	0.35	283	99	1414	226	0
M	25	12	0.35	357	125	1343	161	0
N	25	14	0.35	356	124	1319	185	0
O	25	16	0.35	354	124	1296	207	0
P	25	12	0.25	418	105	1343	161	0,63
Q	25	14	0.25	417	104	1319	185	0,63
R	25	16	0.25	415	104	1296	207	0,62
S	25	12	0.25	418	105	1343	161	1,88
T	25	14	0.25	417	104	1319	185	1,88
U	25	16	0.25	415	104	1296	207	1,87

Los hormigones se elaboraron en una mezcladora de volteo, en pastones de aproximadamente 15 dm., con la misma secuencia de carga y homogenización para evitar variaciones en las características del hormigón en estado fresco o endurecido. De acuerdo a la experiencia adquirida en las pruebas iniciales, el mezclado se realizó en 3 minutos. En primer lugar se incorporó el cemento con los agregados y una vez homogeneizada esta mezcla seca se incorporó paulatinamente el agua, luego de 1,5 minutos de mezclado se añadió el aditivo y se continuó el mezclado completando los 3 minutos.

Ensayos

Para las 21 dosificaciones realizadas y previamente mencionadas, en estado fresco se determinó la consistencia de la mezcla a través del ensayo de tronco de cono de Abrams (IRAM 1536) y el Método de Hand-Squeeze (NRMCA, 2011).

En estado endurecido se determinó la resistencia a compresión a edades de 7 y 28 días, siguiendo la metodología de la norma IRAM 1546. Para ello, se utilizaron probetas cilíndricas de 10 cm x 20 cm, que se compactaron en 3 capas con 10 golpes cada una mediante un pisón Proctor Estándar (peso del pisón es de 4,54 kg y la altura de caída de 45,72 cm, lo cual equivale a una energía de compactación de 396 kJ/m.). Para el ensayo a compresión se emplearon placas de elastómero no adheridas (IRAM 1709). Todas las probetas se desmoldaron a las 24 h y se mantuvieron en curado húmedo en pileta de agua con cal hasta la edad de ensayo.

El contenido de vacíos y la densidad seca se determinaron mediante el método de la balanza hidrostática.

Para la realización del ensayo de índice de permeabilidad, se utilizó un método basado en una propuesta originalmente presentada en el trabajo de Neithalath et al (2003), que se basa en un concepto equivalente al de un permeámetro de carga variable. Como se muestra en la Figura 3, el método de ensayo concebido consiste en la colocación de una muestra de hormigón poroso, de 150 mm de altura, dentro del permeámetro y se controla el tiempo (t) que la altura del agua demora para percolar por el sistema, entre el punto 290 mm (h.) y 70 mm (h.) del cilindro graduado (Figura 3). Este procedimiento se repite cinco veces, siendo el tiempo medio t usado para el cálculo del coeficiente de permeabilidad (k) determinado a partir de la ley de Darcy.

Para el estudio del espesor de pasta y de la porosidad en secciones de probetas mediante análisis de imágenes, se seleccionaron las dosificaciones denominadas A, L, O y U.

La medición del espesor de la pasta se puede realizar con el uso de software o a través de mediciones manuales. En este caso se utilizará una adaptación del método empleado por Torres et al (2015), para lo cual se corta una sección de las probetas correspondientes a cada dosificación, fotografiando cada corte alineando el eje de la cámara con el de la muestra y humedeciendo la probeta para lograr un mayor contraste entre la pasta y los agregados. Las mediciones se realizaron mediante la inserción de las imágenes en el programa AutoCAD y trazando sobre ellas una grilla ortogonal con una separación de 1 cm que corresponde aproximadamente al tamaño máximo nominal del agregado grueso. Las mediciones se realizaron sobre la grilla comenzando por la línea horizontal superior y trabajando de izquierda a derecha, desde el borde del agregado hasta el encuentro con un poro u otro agregado.

Para el estudio de la porosidad en la sección se detallaron los poros en las fotografías de las secciones de hormigón con la ayuda de una tableta gráfica y se procesaron mediante el programa ImageJ desarrollado por el National Institute of Health (E.E.U.U.), en donde se determinó la porosidad total de la sección y la distribución de tamaño de los poros internos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en los ensayos realizados sobre las diferentes muestras evaluadas para determinar sus propiedades en estado fresco y endurecido, se resumen en la Tabla 2.

En estado fresco la totalidad de las mezclas mostraron asentamiento nulo. En la Figura 4, se aprecia el comportamiento de las mezclas en el ensayo de Hand-Squeeze, que consiste en intentar hacer una “bola” de la mezcla con la mano para lo cual la cantidad de agua utilizada en una mezcla es crítica. Un exceso de agua generaría segregación y una escasez de agua dará lugar a pelotas en la mezcla dentro de la hormigonera y tiempo lento de descarga, en tanto que la cantidad correcta de agua impartirá un aspecto húmedo y brillante. Si de apretar y soltar un puñado de la mezcla resulta que se desmorona se trata de una mezcla muy seca, si pierde su estructura y la pasta fluye fuera de los agregados significa que está muy

húmeda. Puede observarse que el comportamiento de las mezclas resultó variable para las distintas razones a/c, contenido de pasta y contenido de finos.

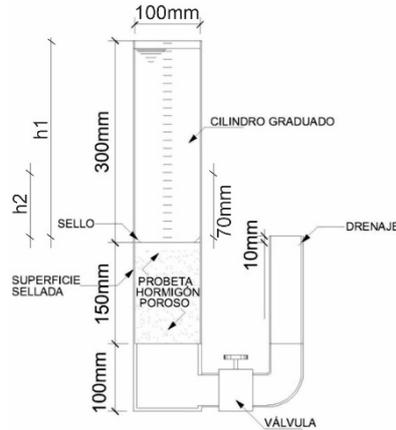


Figura 3
Descripción del permeámetro empleado

Tabla 2
Resultados obtenidos

Dosificación	Volumen de pasta (%)	Porcentaje de finos (%)	Relación A/C	Aditivo químico (kg/m ³)	Resistencia a compresión 7 d (MPa)	Resistencia a compresión 28 d (MPa)	Densidad seca (kg/m ³)	Contenido de vacíos (%)	Absorción (%)	Permeabilidad (cm/s)
A	15	0	0,35	0	2,4	3,5	1691	41,0	5,4	1,14
B	15	6	0,35	0	2,9	3,9	1765	36,2	5,3	1,07
C	15	10	0,35	0	3,1	3,8	1803	32,1	5,6	0,84
D	15	12	0,35	0	3,7	4,6	1838	30,1	5,3	1,21
E	15	14	0,35	0	4,6	5,2	1823	34,1	4,8	1,15
F	15	16	0,35	0	3,6	4,4	1820	34,4	4,5	0,81
G	20	0	0,35	0	4,3	4,8	1732	41,0	4,9	1,32
H	20	6	0,35	0	6,7	6,6	1917	26,3	5,2	1,10
I	20	10	0,35	0	6,7	7,6	1863	30,2	4,8	0,92
J	20	12	0,35	0	6,8	8,7	1926	25,8	4,9	0,63
K	20	14	0,35	0	7,4	9,6	1934	24,8	4,8	0,87
L	20	16	0,35	0	7,1	9,5	1937	23,3	5,0	0,73
M	25	12	0,35	0	13,6	14,9	1892	21,2	5,6	0,68
N	25	14	0,35	0	15,8	18,2	1936	20,3	6,1	0,47
O	25	16	0,35	0	17,3	19,8	1974	17,6	6,0	0,44
P	25	12	0,25	0,63	8,8	9,5	1840	25,5	6,3	0,61
Q	25	14	0,25	0,63	11,2	12,6	1865	24,9	6,1	0,47
R	25	16	0,25	0,62	9,4	10,3	1869	22,0	6,3	0,52
S	25	12	0,25	1,88	11,3	13,3	1886	24,4	5,7	0,66
T	25	14	0,25	1,88	14,7	13,9	1908	23,2	5,5	0,60
U	25	16	0,25	1,87	17,8	19,2	1969	19,2	5,6	0,48



Figura 4
Ensayo de Hand-Squeeze.

Si bien el hormigón drenante se considera una mezcla sin finos, un pequeño porcentaje de partículas finas puede incorporarse para incrementar la resistencia a compresión. La inclusión de agregados finos genera una capa de pasta y/o mortero alrededor de los agregados gruesos de mayor espesor generando un incremento de resistencia (Kumar et al, 2017). Existe una relación significativa entre la resistencia a compresión y la razón agregado fino/agregado grueso, que cuando alcanza 8 % genera un mayor volumen de mortero e incrementa la resistencia con una leve reducción de la permeabilidad (Schaefer, 2005).

En las figuras 5 y 6 se observa que la resistencia tendió a incrementarse, a medida que se incrementó el contenido de pasta y el contenido de finos, tanto a los 7 como a los 28 días. El incremento de la resistencia en función del contenido de finos resultó más significativo para las mezclas con mayores proporciones de pasta, que alcanzaron a 28 días valores de hasta 19,2 MPa. Para las mezclas con 25 % de pasta, se observó que las dosificaciones con mayor relación a/c desarrollaron mayores valores de resistencia, contrario de lo que se esperaría en el hormigón convencional. Ello ocurre por el hecho de que, con una mayor relación a/c, la mezcla gana trabajabilidad y la pasta consigue lubricar mejor la mezcla, permitiendo un mejor acomodamiento de los agregados que quedan mejor envueltos por la pasta. Este efecto no pudo ser compensado con las dosis de superfluidificantes empleados. Este comportamiento se confirmó a partir del análisis de las correlaciones establecidas entre la resistencia y el contenido de finos, para los diferentes contenidos de pasta, en las cuales la pendiente resultó siempre positiva y creciente con el contenido de pasta.

Simultáneamente, se observó que un mayor contenido de pasta y de agregados finos redundó en una reducción en el contenido de vacíos y en la permeabilidad de los hormigones drenantes elaborados (Figs. 8 y 10). En las correlaciones lineales establecidas entre el contenido de vacíos y la permeabilidad vs. contenido de finos, para los diferentes contenidos de pasta, la pendiente resultó siempre negativa y se

hizo más pronunciada con el contenido de pasta. En particular, las mezclas con 25 % de pasta y razón a/c 0,35 mostraron los menores contenidos de vacíos y menor permeabilidad. Al contrario de lo observado en la resistencia a compresión, la permeabilidad tendió a disminuir al aumentar la relación a/c, ello ocurrió debido a un mayor bloqueo de la red de poros por la penetración de la pasta de cemento a través de los agregados. Es recomendable utilizar relaciones w/c entre 0,35 y 0,38 ya que con valores menores se obtienen bajas resistencias (Castro et al, 2009), sin embargo se ha demostrado que con la utilización de aditivos es posible disminuir esta relación consiguiendo incrementar la resistencia y la permeabilidad. Para todas las dosificaciones se observaron valores muy satisfactorios con respecto al flujo de agua, ya que el valor de referencia usado para representar la permeabilidad de un hormigón poroso es del orden de 0,14 a 1,22 cm/s (ACI, 2010).

Puede advertirse a partir de los datos de la Tabla 2, que en general para los hormigones elaborados, el contenido de vacíos resultó mayor al valor objetivo de 20 % fijado para el método de dosificación, alcanzando para los menores contenidos de pasta y finos hasta un 41 %. Sólo para las mezclas con 25 % de pasta y 16 % de finos, los contenidos de vacíos verificados fueron inferiores a 20 %. Según investigadores uruguayos (Spalvier et al, 2021), si el hormigón permeable tiene 15 % de porosidad efectiva, entonces cada 5 cm de espesor de pavimento puede contener 7,5 mm de lluvia, valores muy satisfactorios para el diseño de reguladores de excedentes pluviales.

La absorción de las mezclas no sufrió modificaciones significativas al modificar el contenido de finos, no obstante, se incrementó levemente con el crecimiento del contenido de pasta resultando entre 4,5 y 5,6 % para 15 % y 20 % de pasta y entre 5,5 a 6,3 % cuando el contenido de pasta fue de 25 % (Fig. 9). Esta tendencia quedó confirmada en las correlaciones lineales que mostraron pendientes muy reducidas y cuyas ordenadas al origen resultaron crecientes en función del contenido de pasta de los hormigones.

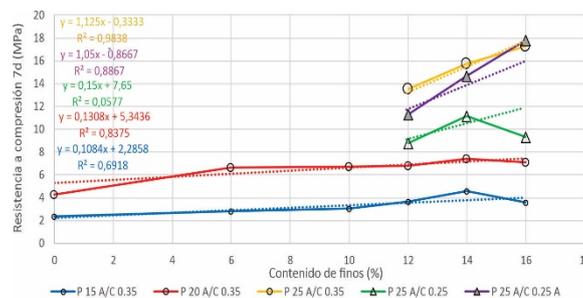


Figura 5
Resistencia a compresión 7 d (MPa)

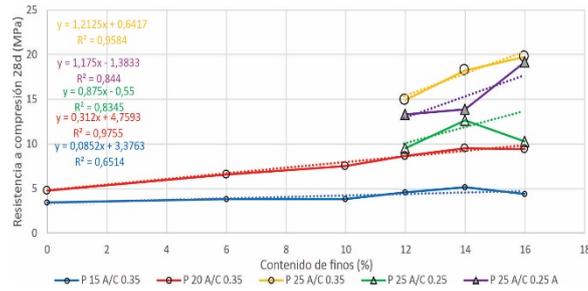


Figura 6:
Resistencia a compresión 28 d (MPa)

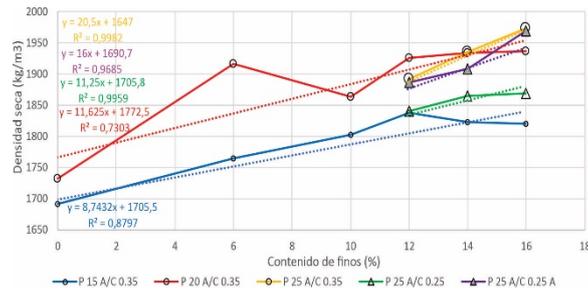


Figura 7
Densidad seca (kg/m³)

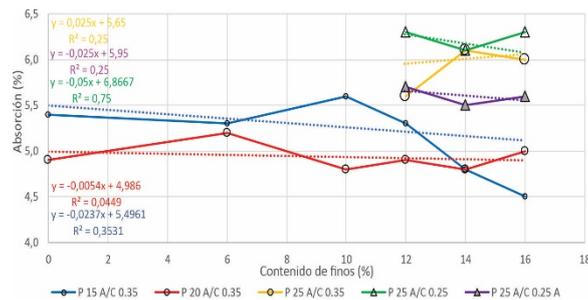


Figura 8
Contenido de vacíos (%)

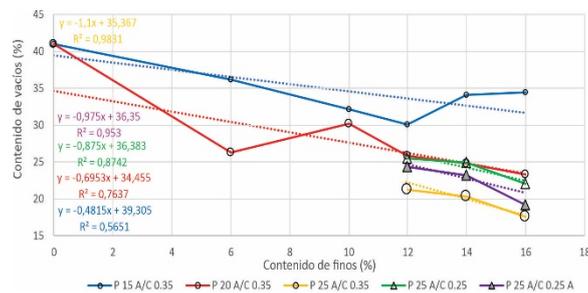


Figura 9
Absorción (%)

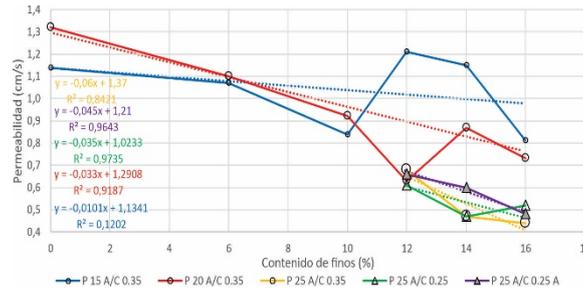


Figura 10
Permeabilidad (cm/s)

En las figuras 11, 13, 15 y 17 se muestran las fotografías tomadas de cortes pulidos de las probetas correspondientes a las dosificaciones A, L, O y U, respectivamente. En las figuras 12, 14, 16 y 18 se pueden apreciar las gráficas en blanco y negro obtenidas para realizar el procesamiento mediante el software ImageJ. Mediante la aplicación de este programa, fue posible medir la el porcentaje de la superficie transversal que representa poros y analizar la distribución de tamaños de poros, como se muestra en la Tabla 3.

La porosidad medida en la sección resultó siempre mayor a aquella determinada por el método de la balanza hidrostática (figura 19). Esta discrepancia se explica porque el estudio de la sección muestra los poros que se encuentran aislados, mientras que en el ensayo de la balanza hidrostática el agua no puede acceder a estos. Por otra parte, debe tenerse en cuenta que en este estudio se evaluó una sección transversal aislada mientras que en la determinación por balanza hidrostática se efectúa el análisis del volumen total de la probeta que correspondería a un promedio de múltiples secciones transversales.



Figura 11
Sección transversal-dosificación A



Figura 12
Sección transversal-dosificación A



Figura 13
Sección transversal-dosificación L



Figura 14
Sección transversal-dosificación L



Figura 15
Sección transversal-dosificación O

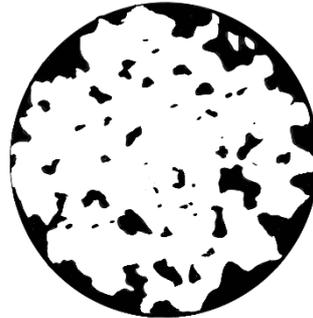


Figura 16
Sección transversal-dosificación O



Figura 17
Sección transversal-dosificación U



Figura 18
Sección transversal-dosificación U

Tabla 3
Caracterización de la porosidad mediante análisis de imágenes

Dosificación	Contenido de vacíos		Espesor pasta (mm)	D10 (mm)	D30 (mm)	D50 (mm)	D90 (mm)	D100 (mm)
	De ensayo (%)	De imágenes (%)						
A	41,0	44,4	1,20	0,009	0,025	0,045	0,501	3,436
L	23,3	37,8	1,52	0,017	0,025	0,050	0,401	2,067
O	17,6	27,4	2,20	0,005	0,019	0,045	0,311	1,017
U	19,2	26,5	2,28	0,005	0,042	0,078	0,258	1,763

En la tabla 3 se muestran los tamaños característicos de poros D10, D30, D50, D90 y D100, correspondientes a cada mezcla, a los percentiles 10, 30, 50, 90 y 100 %, que indican cual es el tamaño de vacíos que define a estas proporciones de la porosidad. Se puede observar que las diferencias en los tamaños de poros se encontraron en los percentiles 90 y 100 % (Figura 20), para los cuales se apreció que el tamaño tendió a disminuir medida que se incrementaba el contenido de pasta. Para los tamaños de poros más pequeños, las diferencias entre las distintas dosificaciones no resultaron significativas.

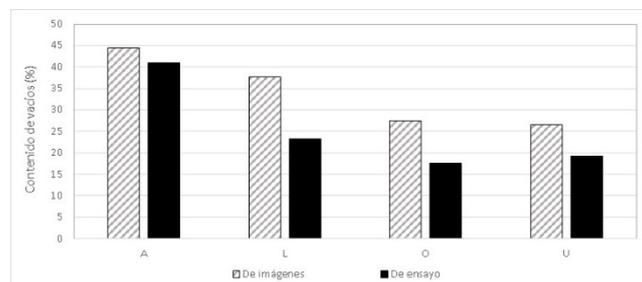


Figura 19
Comparativa entre la porosidad de ensayo y la de sección

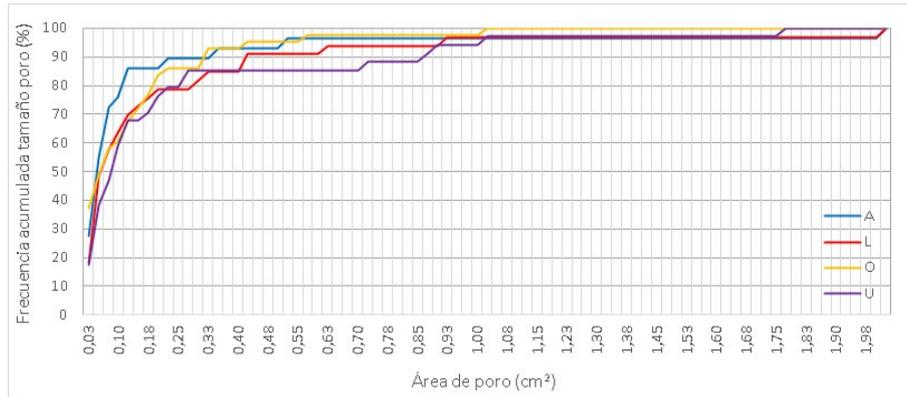


Figura 20
Distribución de poros

Los resultados correspondientes a la medición de espesores de pasta en las dosificaciones A, L, O y U, se muestran en las tablas 5 a 8, respectivamente. Los promedios calculados para cada dosificación se incluyen en la tabla 3.

Tabla 5
Mediciones del espesor de pasta no corregido en Dosificación A

DOSIFICACIÓN A												
Línea de medición	N° de medición											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
H1	1,35	0,82										
H2	0,45	1,07	0,32	0,7	0,72	3,1						
H3	0,94	2,04	1,44	0,41	0,42	0,88	1,35	0,78	1,97	1,88	0,56	1,29
H4	3,08	1,31	0,58	0,2	1,25	1,72	0,79	0,78	0,86			
H5	2,53	2,83	3,03	0,26	1,05	0,1						
H6	1,22	0,63	2,31	0,29	0,32	1,77	0,5					
H7	0,71	0,7	0,81	1,13								
H8	0,37	0,78	0,34	1,91	0,45	0,48	1,38					
H9	0,39	1,29										
H10												
V1	1,38	0,78	0,75	0,71	0,86							
V2	3,52	0,65	0,44	1,5	0,86	2,32	0,6	0,25	1,87			
V3	0,6	1,73	0,41	1,38	0,86	0,2						
V4	0,76	1,89	0,35	0,81	1,61	0,42						
V5	2,5	0,72	0,63	2,31	1,43	1,01	3,72	0,8				
V6	0,52	2,83	1,06	0,19	2,43	1,45	0,18					
V7	1,62	2,1	2,98	0,32								
V8	2,26	2,62										
V9	1,69											
V10												

Tabla 6
Mediciones del espesor de pasta no corregido en Dosificación L

DOSIFICACIÓN L									
Línea de medición	N° de medición								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
H1									
H2	0,41	0,75	2,7	0,7	1,06	2,51			
H3	0,92	0,48	1,89	3,85	0,59	1,88			
H4	0,55	0,22	5,33	0,49	0,7				
H5	1	1,17	2,04	1,59	1,85	2,62	0,91	2,11	
H6	1,07	1,08	0,54	2,34	1,73	2,17	1,31	0,88	
H7	1,59	1,55	0,9	3,44	2,66	2,25	0,27	0,3	
H8	1,33	2,14	6	1,09	0,4	0,44			
H9	0,58	0,75							
H10									
V1	1,29	2,56	0,68						
V2	2,15	1,21	1,37	1,26	1,47				
V3	1,3	1,44	0,82	0,67	0,46	2,01			
V4	2,26	0,6	0,89	1,29	3,45	0,86	3,73	1,88	0,82
V5	0,93	0,68	1,34	2,53	0,66	1,65	0,79	0,91	2,58
V6	1,98	0,86	0,59	2,6	2,67	5,28			
V7	0,86	2,1	0,61	0,94	0,32	0,41	0,76		
V8	1,83	1,23	0,66	2,51	0,7				
V9	2,1	1,53	1,6	2,56					
V10									

Tabla 7
Mediciones del espesor de pasta no corregido en Dosificación O

DOSIFICACIÓN O												
Línea de medición	N° de medición											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
H1	0,61	3,13	3,49	0,47	1,43	5,2						
H2	1,5	2,53	3,08	1,88	1,65	2,44						
H3	0,74	1,12	2,97	3,17	3,24	1,05						
H4	0,74	2,47	2,05	2,86	1,09	0,68	4,96	2,15	1,18	1,14		
H5	1,34	3,14	0,51	3,6	1,97	1,02	4,43	0,78	3,29	0,74	0,48	0,89
H6	1,64	2,37	5,31	1,41	7,34	3,14	0,93	1,12	2,38			
H7	3,28	3,98	2,11	1,37	3,29	1,35	4,97	3,81	1,19			
H8	2,02	1,05	1,9	1,57	6,97	3,97	0,77	0,96				
H9	2,38	1,36	0,33	2,97	0,82	2,61						
H10												
V1	1,43	1,35	2,34	1,35	2,06	2,18	4,87	0,69	1,44	2,33	1,88	
V2	0,85	3,16	4,2	0,56	1,22	1,12	0,86	1,99	1,76	1,33		
V3	1,22	1,77	5,16	1,06	0,97	2,86	2,3	0,97	2,58			
V4	3,91	0,81	4,03	1,63	2,25	3,98	3,32	4,04	2			
V5	1,71	1,8	2,92	0,69	1,19	4,72	2,29	2,63	2,41			
V6	4,14	1,69	1,84	7,18	6,26	3,42						
V7	3,55	1,23	1,4	0,58	1,54	0,52	1,47					
V8	0,87	2,16	1,26	2,21	1,41	4,31	0,43	1,66	2,88	0,9	0,33	
V9	0,5	2,4	1,86									
V10												

Tabla 8
Mediciones del espesor de pasta no corregido en Dosificación U

DOSIFICACIÓN U															
Línea de medición	N° de medición														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
H1	1,81	5,05	4,44	1,79	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
H2	1,57	3,35	0,76	1,87	2,65	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
H3	6,68	0,46	0,92	1,89	1,07	1,79	-	-	-	-	-	-	-	-	-
H4	1,16	0,87	0,83	2,41	2,26	2,7	2,12	2,97	2,69	4,16	-	-	-	-	-
H5	2,56	3,27	0,26	5,92	1,98	2,13	2,51	-	-	-	-	-	-	-	-
H6	0,81	0,62	0,61	1,76	1,27	0,98	0,86	0,78	1,58	2,52	2,57	3,19	0,9	6,14	0,56
H7	6,31	3,04	1,86	5,45	2,61	6,46	0,47	-	-	-	-	-	-	-	-
H8	1,25	0,38	1,13	4,94	0,33	0,6	5,59	2,62	5,72	-	-	-	-	-	-
H9	3	2,93	1,03	1,04	1,33	6,62	1,38	0,48	0,63	1,78	3,59	-	-	-	-
V1	3,19	0,66	2,31	1,53	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
V2	2,22	0,5	3,6	0,98	0,34	2,22	3,79	1,24	0,67	0,15	-	-	-	-	-
V3	0,74	0,24	0,43	0,72	4,02	3,02	1,51	1,7	1,94	3,96	2,34	-	-	-	-
V4	1,51	2,58	3,13	1,29	1,92	0,53	1,96	0,68	1,46	0,83	1,8	2,04	2,03	-	-
V5	7,46	2,43	4,32	1,69	0,29	1,38	2,89	1,82	0,62	3,28	-	-	-	-	-
V6	1,67	1,31	4,66	0,91	3,87	6,19	4,04	2,24	6,73	-	-	-	-	-	-
V7	1,57	3,07	1,21	2,98	7,09	1,62	0,37	0,76	2,84	-	-	-	-	-	-
V8	4,64	1,87	0,95	2,17	1,41	1,43	-	-	-	-	-	-	-	-	-
V9	2,28	1,43	0,28	6,02	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tal como lo indican Torres et al (2015), al emplear una grilla para realizar las mediciones de espesores de pasta se comete cierto error al no tomar la distancia real que se muestra en la figura 21, sino distancias que están ubicadas ortogonalmente. Para tomar en cuenta este error, estos autores proponen utilizar un factor divisor de corrección igual a $\beta=0,63$, suponiendo que todas las mediciones son resultan menores a las reales. La aplicación de este factor implica la mayoración de la totalidad de las mediciones, sin embargo, dado que en las mediciones realizadas se pudo comprobar que se cometían errores tanto por exceso como por defecto, se tomó la decisión de no aplicar este cambio.



- Distancia real
- Distancia medida
- Malla

Figura 21

Error cometido al tomar las mediciones

Con el aumento del espesor de la pasta los resultados indicaron que la resistencia a compresión a 7 y 28 días se incrementaba, ya que con el incremento de pasta se buscó generar una mayor cantidad y tamaño de menisco de pasta entre los agregados (Figuras 22 y 23).

La permeabilidad decreció con el aumento del espesor de pasta (Figura 24). Esto se debe a que al incrementarse el volumen de pasta se llena una mayor proporción de los espacios vacíos que deja el esqueleto granular y, en casos extremos, podrían colmatarse totalmente y quedar incomunicados algunos de ellos reduciendo la fracción permeable en el hormigón. Un comportamiento similar presentó el contenido de vacíos en relación al espesor de pasta medido (Figura 25).

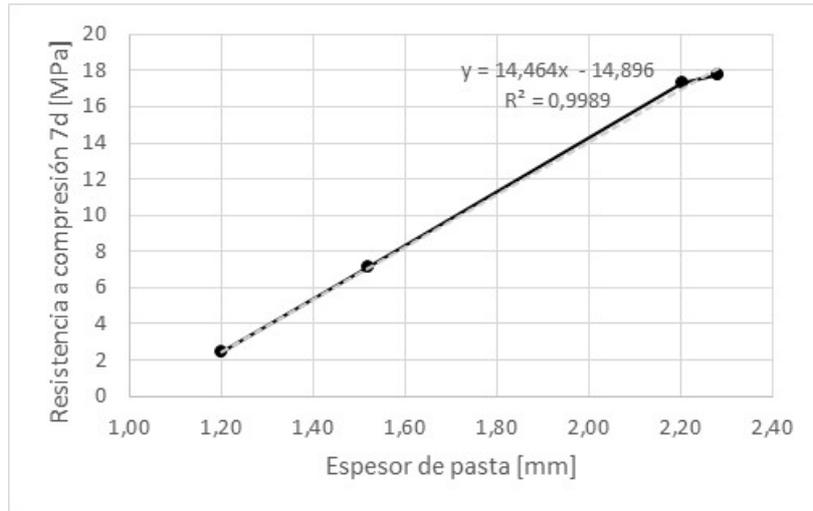


Figura 22
Resistencia a compresión 7d (MPa)

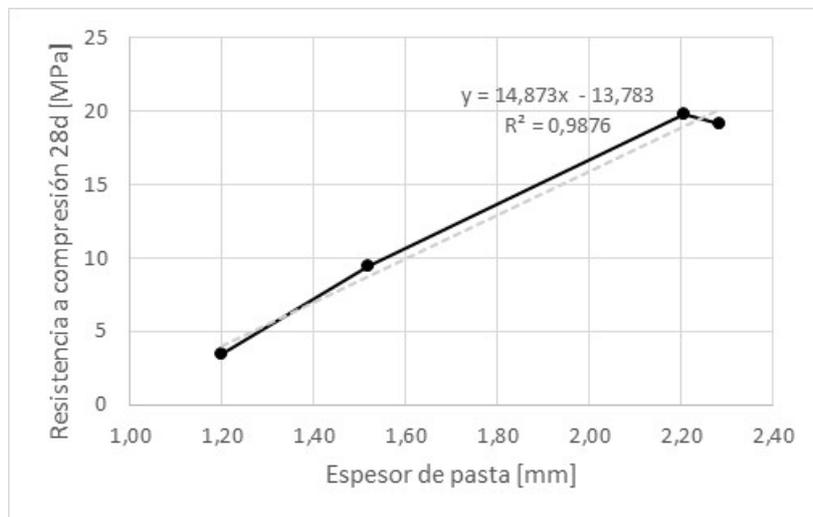


Figura 23
Resistencia a compresión 28d (MPa)

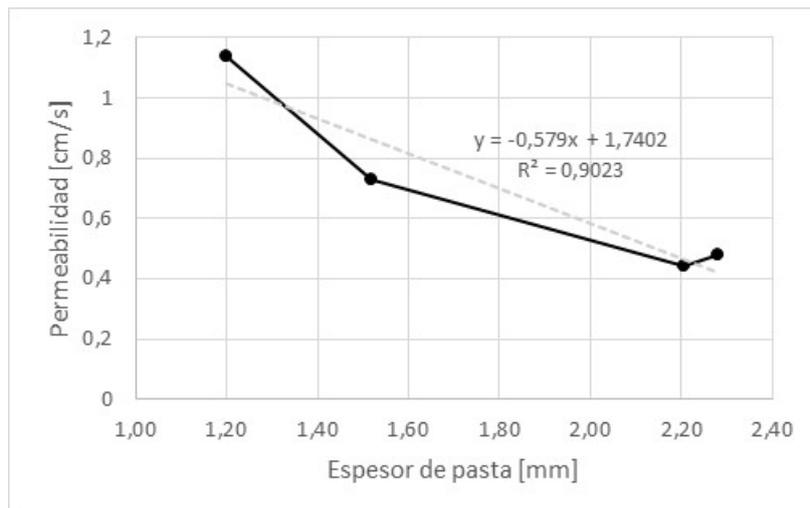


Figura 24
Permeabilidad (cm/s)

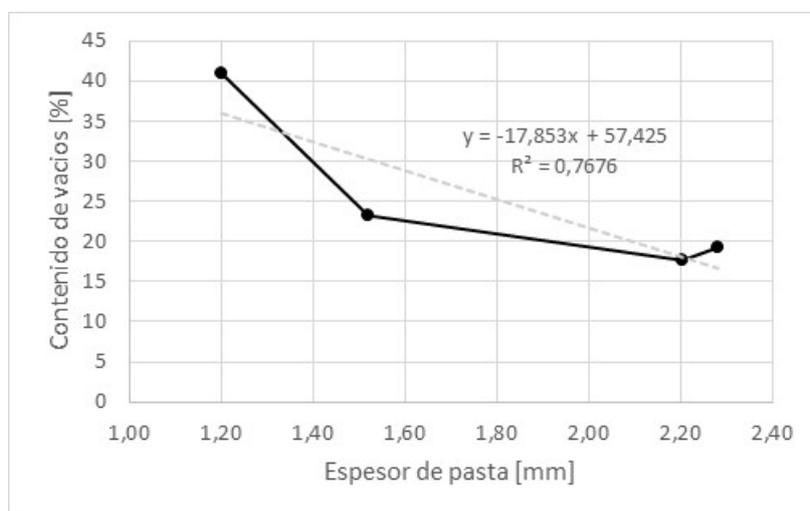


Figura 25
Contenido de vacíos (%)

CONCLUSIONES

Con base al análisis de los resultados de los ensayos se pueden presentar las siguientes conclusiones derivadas del programa experimental expuesto en el presente trabajo:

Se verificó la factibilidad de elaborar hormigones porosos a partir de la utilización de materiales y tecnologías disponibles en el mercado local. Los resultados obtenidos muestran, de acuerdo a los niveles de resistencia y de porosidad, que se trata de un material con características tecnológicas adecuadas para su utilización en pavimentos de bajo nivel de tránsito o en la fabricación de elementos premoldeados.

La permeabilidad, para todas las dosificaciones de hormigón drenante elaboradas, fueron elevadas y superiores a 0,4 cm/s. Se obtuvieron valores superiores a 0,34 cm/s, que muchos autores adoptan como límite a respetar

para obtener un adecuado diseño hidrológico. La permeabilidad y contenido de vacíos disminuyeron con el aumento del espesor de la pasta. No se observó una dependencia con la distribución de tamaño de los poros, siendo por lo general menores a 0,075 cm..

Para el conjunto de dosificaciones estudiadas, la resistencia a compresión aumentó con el incremento del contenido de pasta de cemento y el contenido creciente de agregado fino, alcanzando resistencias a 28 días de hasta 19,8 MPa. El espesor de la pasta circundante tuvo una directa correlación con la resistencia mecánica, a mayor espesor se incrementó la resistencia.

Se deben realizar nuevos estudios empleando mayores dosis de aditivos superfluidificantes a fin de mejorar los niveles de resistencia alcanzados con menores niveles de razón a/c.

REFERENCIAS

- ACI Committee 522 (2010). *Report on Pervious Concrete, ACI 522R-10*, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, USA, 1-38.
- ACI Committee 522.1 (2013). *Specification for Pervious Concrete Pavement, ACI 522.1-13*, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, USA, 1-7.
- Aguirre D.D., Argento R.S., Carrasco M.F. (2022) "Hormigones Drenantes como Retardadores de Excedentes Pluviales", IX Congreso Internacional y 23ª Reunión Técnica de la Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, Buenos Aires, Argentina, 30 de octubre a 4 de noviembre, 511-519.
- Barišić I., Grubeša I. N., Barjaktarić I. (2017). "Pervious Concrete for Road Intersection Drainage", *Int. J. Civil, Environ. Struct. Constr. Archit. Eng.*, vol. 11, no. 2, 89–94
- Berardi U., GhaffarianHoseini A., GhaffarianHoseini A. (2014). "State-of-the-art analysis of the environmental benefits of green roofs", *Applied Energy*, 411-428.
- Castro J., De Solminihac H., Videla C., Fernández B. (2009). "Estudio de dosificaciones en laboratorio para pavimentos porosos de hormigón", *Revista Ingeniería en Construcción*, Vol. 24, N° 3, 271–284.
- Castro Espinosa, M. L. (2011). "Pavimentos permeables como alternativa de drenaje urbano", Tesis de grado de Ingeniería Civil, Pontificia Universidad Javeriana, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil, Bogotá Colombia.
- 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*, N° 36, 81–104.
- Hernández C., Collura A., Mansilla G. (2008). "Hormigón poroso", Actas del II Congreso Internacional y 17ª Reunión Técnica de la Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, Córdoba, Argentina, 29 al 31 de octubre, 87–94.
- Holtz, F. (2011). "Uso de concreto permeável na drenagem urbana: analise da viabilidade técnica e do impacto ambiental", Tesis de Maestría, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil.
- Kumar G.A., Dinesh B.S.V., Krishna G.V., Sreenivas K. T, Kumar K.V. (2017). "Improvement of compressive strength of pervious concrete", Tesis de grado, Narayana Engineering College, Nellore, India.
- Larrard F., Belloc A. (1997). "Influence of aggregate on the compressive strength of normal and high-strength concrete", *ACI Mater J*, 94 (5), 26–27.

- Miraglio M.E., Aguirre D.D., Fogliatti F. (2021) “Uso del hormigón drenante como alternativa a los sistemas de regulación pluvial convencionales”, Actas de la Jornada de Jóvenes Investigadores Tecnológicos, JIT 2021, Santa Fe, Argentina, 6 y 7 de octubre, 243-247.
- Montes F., Valavala S., Haselbach M. (2005). “A new test method for porosity measurements of Portland cement pervious concrete”, *J. ASTM Int.* 2 (1), Paper ID JAI12931.
- National Ready Mixed Concrete Association (NRMCA) (2011). “Pervious Pavement. Materials and Mix Design”. Disponible Online en: <https://www.perviouspavement.org/materials.html> (acceso:28-05-2022).
- Neithalath N., Weiss W.J., 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.
- Rautenberg D.P., Sota J.D., Palacio A.J., Hernandez C., Weber J.F., Carrasco M.F., Aguirre D.D. (2021). “Aplicaciones del hormigón poroso en el ciclo del agua”, *Revista Técnica CEMENTO HORMIGÓN*, N° 1.006, Septiembre-octubre 2021, 72-79.
- Schaefer V.R., Wang K., Sulieman M.T., Kevern JT. (2005). “Mix design development for pervious concrete in cold weather climates”, Actas del 2005 Mid-Continent Transportation Research Symposium, Ames, Iowa, 18 a 19 de agosto, 1-11.
- Singh A., Sampath P. V., Biligiri K. P. (2020). “A review of sustainable pervious concrete systems: Emphasis on clogging, material characterization, and environmental aspects”, *Constr. Build. Mater.*, vol. 261, p. 120491
- Sonebi M., Bassuoni M., Yahia A. (2016). “Pervious Concrete: Mix Design, Properties and Applications”, *RILEM Tech. Lett.*, vol. 1, 109-115.
- Spalvier A., Díaz A., Marrero I., Baliosian T., Pielarisi R., Segura L. (2021). “Recomendaciones sobre Pavimentos de Hormigón Permeable”, Grupo de Hormigón Estructural, Instituto de Estructuras y Transporte, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República (Uruguay). Disponible Online en: <https://www.gub.uy/ministerio-ambiente/comunicacion/publicaciones/pavimentos-hormigon-permeable> (acceso: 28-05-2022).
- Tennis P., Leming M., Akers D. (2004). *Pervious Concrete Pavements*. Maryland: Portland Cement Association and National Ready Mixed Concrete Association, 36 pp.
- Torres A., Hu J., Ramos A. (2015). “The effect of the cementitious paste thickness on the performance of pervious concrete”, *Construction and Building Materials*, 95, 850-859.
- Weber J., Positieri M.J., Gonzalez N., Rautenberg D. (2015). “Metodología para la determinación en laboratorio de la capacidad de infiltración y almacenamiento de hormigones porosos”, Actas del IV Simposio sobre Métodos Experimentales en Hidráulica – MEHIVAt, La Plata, Argentina, 18, 19 y 20 de marzo.
- Yang J., Jiang G. (2003). “Experimental study on properties of pervious concrete pavement materials”, *Cem Concr Res*, 33(3), 381–386.