

Concreto permeable

Diseño de mezclas para evaluar su resistencia a la compresión uniaxial y su permeabilidad.

Ing. Roberto J. Fernández Arrieta
Asistente de investigación; Laboratorio Hidrosistemas Ven Te Chow.
Universidad de Illinois en Urbana-Champaign.
Ing. Alejandro Navas Carro, MSc.
Director, Laboratorio Nacional de Materiales
y Modelos Estructurales (Lanamme).
Universidad de Costa Rica

Fecha de recepción: 22 de noviembre del 2010

Fecha de aprobación: 04 de Mayo del 2011

Resumen

El concreto permeable es un material que puede ser usado en pavimentos de bajo volumen, calles de urbanizaciones o parqueos, entre otros. Es una mezcla de cemento, agua y agregado grueso. La resistencia y la permeabilidad del concreto poroso son sus características más importantes y deben balancearse para lograr un desempeño adecuado del material.

Esta investigación analizó el efecto que tienen, sobre 19 mezclas de concreto permeable, la relación agua/cemento, la relación agregado grueso/cemento y el tipo de agregado grueso utilizado (procedencia y tamaño máximo). Los resultados obtenidos permitieron observar tendencias de comportamiento entre las distintas propiedades y la resistencia y permeabilidad del material.

Palabras clave: concreto permeable; diseño de mezclas; resistencia a la compresión uniaxial; pavimentos.

Abstract

Pervious concrete maybe used in low transit pavements, condominium and residential streets, or parking lots, among others. It is a mixture of cement, water and coarse aggregates. Strength and permeability are pervious concrete's most important characteristics and must be correctly balanced to attain adequate performance.

This study analyzed the effect of water/cement ratio, coarse aggregate/cement ratio, and the type of coarse aggregate used (maximum size and source) over 19 pervious concrete mixes. Behavior trends showing the relation between the stated properties and the uniaxial compressive strength and permeability of the material were observed from the results obtained.

Keywords: *pervious concrete; mixture design; uniaxial compressive strength; pavements.*

APORTE

El crecimiento acelerado de las urbes, asociado con su proceso de impermeabilización de grandes áreas de terreno, genera disminución de los tiempos de concentración y aumento en los volúmenes de escorrentía superficial lo que provoca inundaciones urbanas.

Costa Rica vive actualmente problemas de este tipo. Por esta razón, se quiso investigar el concreto permeable con el fin de generar mezclas adecuadas para su uso como sistema integrado de pavimento y laguna de retención para el manejo de la escorrentía superficial.

INTRODUCCIÓN

Los primeros usos reconocidos del concreto permeable se dieron en Europa en el siglo XIX. Sin embargo, sus aplicaciones crecieron especialmente al concluir la Segunda Guerra Mundial, como una respuesta ante la necesidad de reconstruir edificaciones y carreteras con medios limitados. La escasez de materiales, así como el alto costo de estos y su transporte, dieron paso a la utilización de un concreto sin finos que disminuía los contenidos de cemento (pasta) en las mezclas y permitía reciclar escombros.

En Estados Unidos, el concreto permeable surgió en la década de 1970 como una respuesta ante el aumento en los niveles de escorrentía superficial producto de un aumento en áreas urbanizadas con coeficientes de escorrentía altos. Con el tiempo, se dió paso al uso de un material poroso que permitiera transformar la escorrentía superficial en infiltración y además cumpliera una función práctica dentro del desarrollo urbano (i.e. aceras, estacionamientos, canchas de tenis, ciclo vías entre otros).

Costa Rica ha experimentado un crecimiento urbano acelerado en el último par de décadas y año tras año, durante la estación lluviosa, se dan importantes inundaciones en zonas urbanas. El uso de concreto permeable en estas áreas vendría a funcionar como sistema temporal de retención de la escorrentía superficial sin afectar el desarrollo urbano.

La posibilidad de utilizar este material en Costa Rica motivó esta investigación, cuyo objetivo principal consiste en determinar la influencia que tienen sobre la

resistencia a la compresión uniaxial y la permeabilidad del concreto permeable los siguientes factores: relación agua/cemento, tipo de agregado grueso (procedencia y tamaño máximo), contenido de vacíos de la mezcla, relación agregado grueso/cemento y peso unitario de la mezcla.

Antecedentes

Previo a esta investigación, Fernández, 2008, no se habían realizado estudios en cuanto al uso de concretos permeables en Costa Rica. La situación hasta el año 2006 en otros países mostraba estudios independientes de universidades e instituciones privadas pero no existía normativa que permitiera unificar los criterios con el fin de diseñar las mezclas de concreto permeable.

En Costa Rica existen actualmente aplicaciones con el uso de concreto permeable, sin embargo, la mayoría incluyen el uso de aditivos proporcionados por compañías privadas que encarecen las mezclas. La realidad económica de muchos municipios y la necesidad de resolver los problemas de inundaciones urbanas promovieron el desarrollo de esta investigación, con el fin de conocer el comportamiento del concreto permeable con materiales costarricenses y determinar la posibilidad de alcanzar una resistencia y permeabilidad adecuada para aplicaciones de menor costo pero funcionalidad adecuada.

PRINCIPALES VARIABLES QUE AFECTAN EL COMPORTAMIENTO DEL CONCRETO PERMEABLE, SEGÚN ACI 522-06 (2006)

Porcentaje de vacíos

El porcentaje de vacíos que presentan las mezclas de concreto permeable varía según la energía de compactación, la granulometría del agregado utilizado, la relación agua/cemento y el contenido de material cementante utilizado (ACI 522-06, 2006). Los rangos de porcentajes de vacíos que se han obtenido en laboratorio y en muestras extraídas de aplicaciones de campo oscilan entre 15% y 40% (Mulligan, 2005). Según el National Concrete Pavement Technology Center (2006) tanto la resistencia a la compresión uniaxial como el peso unitario de las mezclas de concreto permeable presentan una variación lineal con respecto al porcentaje de vacíos. En el caso de la permeabilidad, su variación es de forma exponencial con respecto al contenido de vacíos. La permeabilidad del concreto permeable aumenta con el porcentaje

de vacíos mientras que la resistencia a la compresión uniaxial disminuye.

Tamaño máximo, procedencia y rugosidad o forma del agregado grueso

En el concreto permeable, a diferencia del concreto convencional, la cantidad de pasta es limitada y por esta razón, la resistencia depende de los contactos entre los agregados. Estos contactos se pueden obtener usando agregados lisos y redondeados de río. (Crouch et al. 2005) indican que estos agregados, por su forma y textura, disminuyen la cantidad de vacíos en comparación con las mezclas que utilizan agregados angulosos y rugosos. Las resistencias aumentan, ya que existe un menor contenido de vacíos en el material y esto genera trabazón entre las partículas.

En el caso de la permeabilidad, no existen diferencias importantes entre el uso de agregados de forma redondeada o angulosa. Crouch et al. (2005) indican que granulometrías más uniformes y de tamaño máximo menor sí disminuyen la permeabilidad del concreto poroso, pero que su efecto no es tan pronunciado como la ganancia en resistencia que se obtiene.

Relación agua/cemento (w/c)

El balance adecuado entre permeabilidad y resistencia del concreto poroso puede lograrse con relaciones agua cemento entre 0,27 y 0,30 (National Concrete Pavement Technology Center, 2006). Estas relaciones son bajas y generan mezclas con poca trabajabilidad. El principal inconveniente de aumentar las relaciones agua cemento, en un material tan poroso como el concreto permeable, es que la pasta puede escurrir por gravedad a través de los conductos internos hacia el fondo del elemento (losa, cilindro, etc.), obstruyéndolos e impidiendo así el paso del agua. Si esto ocurre, pueden obtenerse valores de resistencia a la compresión uniaxial aceptables pero permeabilidades muy bajas (Mulligan, 2005).

La relación agua cemento adecuada también depende del tamaño máximo del agregado utilizado, la granulometría, la relación agregado grueso/cemento y el uso de aditivos. Por esta razón, aunque se recomiendan relaciones agua cemento cercanas a 0,30, este valor puede variar ante la influencia de las variables anteriores.

Relaciones bajas agregado/cemento implican que existe un mayor porcentaje de pasta, capaz de proveer mejores enlaces entre las partículas de agregado y con ello aumentar las resistencias. Sin embargo, este aumento porcentual de pasta implica que se rellenen mayor cantidad de vacíos lo cual provocará disminuciones en la permeabilidad.

Mulligan (2005) estudió relaciones AG/c entre 4/1 y 8/1, llegando a la conclusión de que la permeabilidad no se ve seriamente afectada por esta variable mientras la pasta no provoque obstrucciones. Sin embargo, descubrió que las relaciones AG/c que brindan resistencias aceptables para pavimentos se encuentran entre 4/1 y 5/1 como máximo.

El uso de cierto porcentaje de agregado fino con respecto al agregado grueso (AF/AG) fue estudiado por Fernández, Vítola y Salminci (2001). En su estudio indican que valores entre 5% y 30% se recomiendan según el uso que se le quiera dar al concreto poroso. El límite inferior se recomienda para que la adherencia del mortero con las partículas de agregado sea lo suficientemente fuerte como para evitar segregación y resistencias muy bajas. El límite superior se recomienda para generar resistencias mayores, pero sin llegar al punto en el que se colmaten los vacíos del material y se disminuya la permeabilidad del mismo. Adicionalmente, el uso de agregado fino aumenta la trabajabilidad de las mezclas lo cual implica un beneficio en su manejo y colocación.

Uso de aditivos

Usualmente las mezclas requieren el uso de plastificantes, reguladores de viscosidad y retardantes. El uso de otros aditivos como sílice, látex, fibras o cenizas volantes mejora las características del material pero eleva los costos. El efecto de los aditivos en las mezclas mejora las resistencias y no afecta de forma importante la permeabilidad. Fernández et al. (2001) reconoce la realidad latinoamericana y recomienda analizar con detalle este aspecto para no elevar el costo de las mezclas.

Mezclado y fabricación de cilindros

Se diseñaron 16 mezclas bajo condiciones de laboratorio usando normativa ASTM desarrollada para concreto convencional, ya que no existe normativa específica para concreto permeable. De los 16 diseños, tres dieron resultados satisfactorios por lo que se reprodujeron para un total de 19.

Las mezclas se identificaron como M-XX donde las XX corresponden con la numeración, desde la 1 hasta la 19, en orden cronológico. A partir de la mezcla M4 se intentó fabricar siempre 12 cilindros de 15 cm x 30 cm para las pruebas de resistencia a la compresión uniaxial y dos o tres de 10 cm x 20 cm para las pruebas de permeabilidad. En todos los casos se tuvieron al menos 6 cilindros de 15 cm x 30 cm para determinar la resistencia a la compresión uniaxial.

Resistencia a la compresión uniaxial de cilindros

Las pruebas de resistencia a la compresión uniaxial se hicieron de acuerdo con la norma ASTM C-39 (2002). Uno de los objetivos específicos de este estudio consistió en determinar las curvas de desarrollo de la resistencia a la compresión uniaxial en el tiempo para el concreto poroso. Para esto se decidió ensayar a 4 edades: 3, 7, 28 y 56 días.

La determinación de la resistencia a la compresión uniaxial en cilindros de concreto convencional puede hacerse coronando con yeso cemento o con almohadillas de neopreno. En esta investigación, se elaboró una mezcla que permitiera determinar cuál de estos dos métodos de coronamiento era mejor y dado que no se encontró variación significativa con el uso de uno u otro método, se optó por utilizar las almohadillas de neopreno por sencillez.

Resistencia a la compresión uniaxial de núcleos

En esta investigación se hizo una prueba para determinar la resistencia que presentarían núcleos de concreto permeable comparados con cilindros fabricados con la misma mezcla. Se fabricaron tres losas para simular el comportamiento en campo del material, con dimensiones de 0,20 m x 0,50 m x 0,50 m. Se descargó el concreto desde la mezcladora en la formaleta y se acomodó el material manualmente. Finalmente se les dió un acabado con un rodillo liso.

No fueron compactadas ni se utilizó vibración. Con la misma mezcla se fabricaron cilindros de 10 cm x 20 cm para obtener la resistencia a la compresión uniaxial de los cilindros y de núcleos extraídos de las losas y compararlos.

Cilindros de 15 cm x 30 cm versus cilindros de 10 cm x 20 cm

Las pruebas de resistencia a la compresión uniaxial en esta investigación se realizaron con cilindros de 15 cm x 30 cm. Sin embargo, las pruebas de comparación entre núcleos y cilindros se realizaron con cilindros de 10 cm x 20 cm por lo que se elaboró una mezcla de prueba en la que se fabricaron tres cilindros de 15 cm x 30 cm y tres de 10 cm x 20 cm, para comparar los valores de resistencia obtenidos.

Permeabilidad

Las pruebas de permeabilidad para las primeras ocho mezclas se hicieron utilizando un modelo de permeámetro de carga variable. Sin embargo, luego se optó por utilizar un modelo de permeámetro de carga

constante. El resultado del segundo se consideró como el adecuado.

A la fecha en que se concluyó esta investigación, el comité C49.09 de la ASTM no había establecido cuál modelo de carga (variable o constante) es el adecuado para este tipo de concreto. El Comité 522 del ACI presentó el permeámetro de Neithalath et al. (2006) sin embargo, durante este estudio se descubrió que la constante propuesta por ese autor y que aparece en el ACI 522R-06 (2006) presenta un error igual a logaritmo natural de 10 ($\ln(10) = 2,303$). En la deducción de la ecuación del modelo de carga variable, Neithalath et al. (2006) omitieron esta constante y por lo tanto los valores de permeabilidad obtenidos a partir de su permeámetro arrojan valores con un error igual al valor de esta constante.

Dosificaciones

Las mezclas diseñadas para las pruebas se muestran en el cuadro 1. En el cuadro 2 se presentan las relaciones utilizadas en cada una de las mezclas, según las variables analizadas.

Proporciones de cada una de las 16 mezclas desarrolladas (valores totales) **Cuadro 1**

Identificación de la mezcla	Materiales						Aditivos		Procedencia del AG
	Agua w (kg)	Cemento c (kg)	Agregado grueso AG (kg)	T _{máx} (mm)	Agregado fino AF (kg)	Plastificante (cm ³)	Regulador de viscosidad (cm ³)	Retardante (cm ³)	
M1	7.0	19	71	12	0	0	0	0	río
M2 - S ^a M2 - C ^a	10.5	32	128	12	0	0	0	0	río
M3	9.4	35	140	12	0	4	0	0	río
M4	9.0	30	135	12	0	4	0	0	río
M5	5.1	16	65	9.5	0	32	0	0	río
M6	5.0	19	84	9.5	0	56	0	0	río
M7	9.2	30	130	12	10	75	0	0	río
M8 ^b	11.0	39	168	12	0	98	0	0	río
M9	7.8	35	150	12	0	70	0	0	cantera
M10	7.0	30	135	16	0	150	0	0	río
M11	8.0	30	135	12	0	150	0	0	cantera
M12	7.1	30	135	12	0	150	0	0	río
M13	7.7	30	120	16	0	150	0	0	río
M14	7.7	30	120	12	0	150	0	0	río
M15	8.2	30	120	12	0	150	0	0	cantera
M16	9.1	30	130	16	0	49	14	79	río

^a Los cilindros no fueron compactados mediante el varillado como lo indica ASTM C-31 (2006).

^b Mezcla utilizada para determinar si existía diferencia entre el uso de yeso cemento o las almohadillas de neopreno como método de coronamiento en las pruebas de resistencia a la compresión uniaxial según ASTM C-39 (2002).

Cuadro 2 Relaciones utilizadas en cada una de las mezclas

Identificación de la mezcla	Relaciones			
	w/c	AG/c	aditivo/cemento (cm ³ /kg)	AF/AG
M1	0.37	3.7	0.0	0%
M2 - S M2 - C	0.33	4.0	0.0	0%
M3	0.27	4.0	0.1	0%
M4	0.30	4.5	0.1	0%
M5	0.32	4.0	2.0	0%
M6	0.27	4.5	3.0	0%
M7	0.31	4.7	2.5	0%
M8	0.28	4.3	2.5	0%
M9	0.22	4.3	2.0	0%
M10	0.23	4.5	5.0	0%
M11	0.27	4.5	5.0	0%
M12	0.24	4.5	5.0	0%
M13	0.26	4.0	5.0	0%
M14	0.26	4.0	6.0	0%
M15	0.27	4.0	5.0	0%
M16	0.30	4.3	7.0	0%

Los resultados obtenidos a partir de las 16 mezclas preliminares motivaron a repetir la M7, la M8 y la M14 para generar nuevos cilindros y tres losas. Por último, para determinar la diferencia entre la resistencia a la compresión uniaxial entre los cilindros de 10 cm x 20 cm y los cilindros de 15 cm x 30 cm se elaboró una mezcla utilizando las proporciones de la M7.

Cuadro 3 Comparación de resultados de resistencia a compresión uniaxial según tipo de coronamiento

Tipo de coronamiento	Promedio de toda la muestra (MPa)	Desviación estándar (MPa)	Promedio sin valores extremos (MPa)	Desviación estándar (MPa)
Yeso - cemento	13.0	0.98	12.9	0.78
Almohadillas de neopreno	12.7	1.08	12.9	0.78

Cuadro 4 Comparación de resultados de resistencia en cilindros de 10 cm x 20 cm y de 15 cm x 30 cm

Parámetro	Cilindros	
	10 cm x 20 cm	15 cm x 30 cm
Promedio (MPa)	10.5	10.5
Desviación estándar (MPa) (kg/cm ²)	2.55	1.57
Coefficiente de variación (%)	24	15

RESULTADOS

Coronamiento

Se ensayaron 8 cilindros a compresión uniaxial coronados con yeso-cemento y otros 8 coronados con almohadillas de neopreno. La resistencia a la compresión uniaxial promedio obtenida mediante ambos métodos difiere en menos de un 2,5% para la totalidad de la muestra y se vuelve nula al despreñar los valores máximo y mínimo de resistencia obtenidos para cada tipo de coronamiento (ver cuadro 3). Por lo tanto, se optó por realizar las pruebas de resistencia a la compresión uniaxial de las demás mezclas utilizando las almohadillas de neopreno.

Resistencia en cilindros de 10 cm x 20 cm y en cilindros de 15 cm x 30 cm

Los resultados de la mezcla elaborada para comparar las resistencias a la compresión uniaxial obtenidas en cilindros de 15 cm x 30 cm y de 10 cm x 20 cm se resumen en el cuadro 4, donde se muestra que la diferencia entre las resistencias promedio no varía de manera importante; sin embargo, el coeficiente de variación es mayor para los cilindros de 10 cm x 20 cm.

Si bien los resultados obtenidos indican que no existe variación entre el uso de uno y otro tamaño en términos del promedio, la muestra utilizada no es estadísticamente representativa y no puede generalizarse este resultado, aunque permitió observar la tendencia específica para la mezcla generada.

Resistencia a la compresión uniaxial de núcleos y cilindros

Las últimas 3 mezclas que se realizaron buscaban comparar la diferencia de resistencia a la compresión uniaxial que presentaría el concreto permeable en el campo y en el laboratorio. Se fabricaron tres losas de las cuales se extrajeron núcleos para comparar con las resistencias de los cilindros generados con la misma mezcla a 7 días de edad. Los resultados obtenidos se presentan en el cuadro 5 y en ningún caso los núcleos alcanzaron una resistencia superior al 60% de la resistencia alcanzada por los cilindros.

Las resistencias a la compresión uniaxial de los núcleos suelen ser menores que las de los cilindros colados con la misma mezcla. El proceso de extracción de núcleos, al generar vibración dentro del elemento, rompe enlaces

entre partículas, lo que provoca pérdidas de resistencia en el espécimen.

La matriz interna del concreto permeable es más propensa a debilitarse. Los resultados obtenidos muestran una disminución apreciable de la resistencia medida en núcleos por lo que el porcentaje de aceptación de la resistencia obtenida mediante núcleos de concreto permeable podría ser menor que el correspondiente a concreto convencional, sin embargo, este aspecto debe investigarse más a fondo.

Resistencia a la compresión uniaxial de las mezclas fabricadas

La figura 1 presenta las curvas de resistencia a la compresión uniaxial de las 19 mezclas fabricadas. En ella se observa que 10 mezclas no alcanzaron el valor de resistencia mínimo de diseño, establecida como 10,3 MPa (105 kg/cm²). De las seis mezclas que superaron la resistencia de diseño sólo tres se reprodujeron (M7, M8 y M14) debido a que las otras tres no son sencillas de reproducir en campo ni se consideran convenientes para aplicaciones del material.

Curvas de desarrollo de resistencia en el tiempo

A pesar de que algunas mezclas no alcanzaron la resistencia de diseño, en la figura 1 se observa que en general presentan un comportamiento similar en cuanto al desarrollo de la resistencia en el tiempo. Con los datos de todas las mezclas se obtuvo la curva de desarrollo de resistencia en el tiempo en términos porcentuales. Los resultados se presentan en el cuadro 6 y en la figura 2, donde puede observarse que, en promedio, las mezclas de concreto permeable alcanzaron una resistencia de un 80% a los 3 días, de 84% a los 7 días y de 101% a los 56 días.

Resultados de permeabilidad

Los resultados de permeabilidad obtenidos se resumen en el cuadro 7. La comparación entre el modelo de carga variable y de carga constante se hizo con las mezclas M3 a la M9. Las demás mezclas solamente fueron ensayadas utilizando el modelo de carga constante. En promedio, la permeabilidad obtenida utilizando el método de carga variable es 1,5 veces la obtenida utilizando el método de carga constante y la variación entre muestras disminuye al utilizar este último.

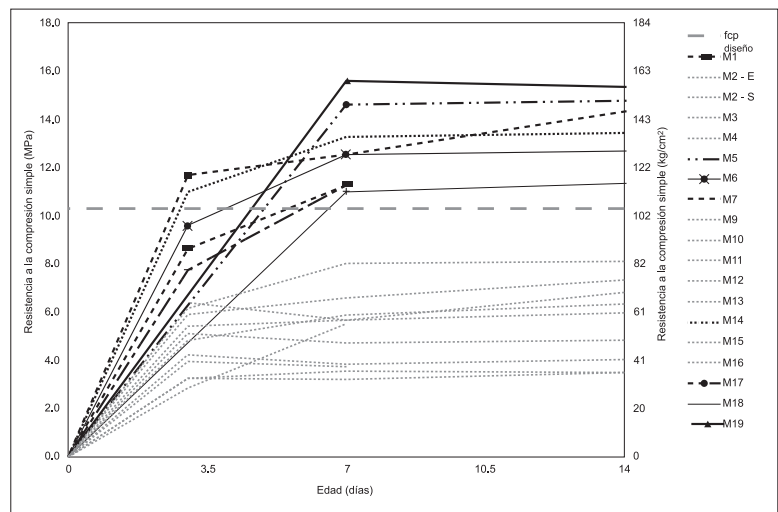
Comparación de la resistencia a la compresión uniaxial en núcleos y cilindros de concreto

Cuadro 5

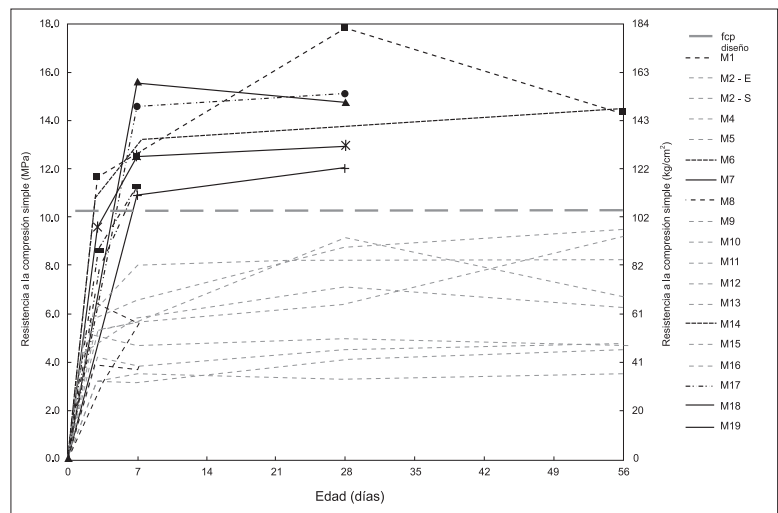
Mezcla	Resistencia a 7 días (MPa)		Razón (1)/(2) (%)
	Núcleos (1)	Cilindros (2)	
M 17	5.79	14.6	40
M 18	6.28	11.0	57
M 19	4.61	15.6	29
Promedio	5.59	13.7	42
Desviación estándar	0.88	2.45	14
Coefficiente de variación (%)	16	18	33

Curvas de desarrollo de resistencia a la compresión uniaxial para todas las mezclas (a) hasta los 14 días (b) hasta los 56 días

Figura 1

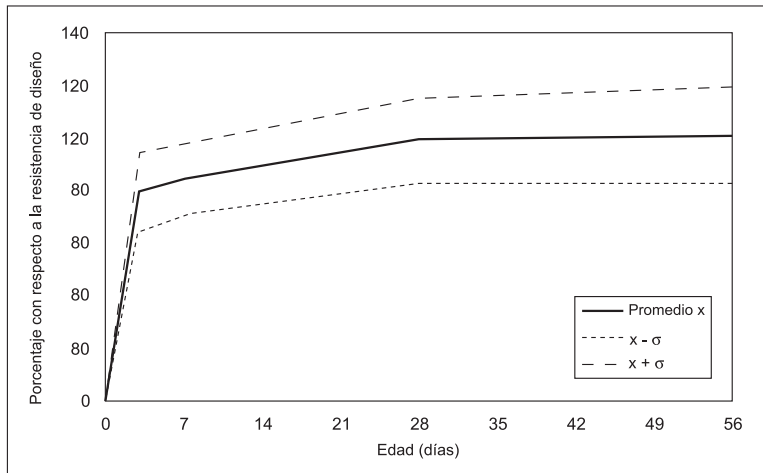


(a)



(b)

Figura 2 Curvas de desarrollo de resistencia típica del concreto permeable ($f'_{cp} = 100\%$ a los 28 días).



Los valores de permeabilidad mostrados en el cuadro 7 permiten el uso de este concreto como parte de un sistema de pavimento para el manejo de la escorrentía superficial en Costa Rica. En el cuadro 8 se presenta una comparación de los valores mínimo, promedio y máximo de permeabilidad obtenidos con eventos de lluvia esperados en el Valle Central cada 100 años con una duración de 5 minutos.

Se observa que la permeabilidad promedio del concreto poroso estudiado (1,50 cm/s) es 150 veces el valor de intensidad máxima esperada en la estación de Santa Lucía, en Heredia, que es una de las que presenta los eventos más intensos de todo el país (Murillo, 1994).

Influencia de las variables analizadas sobre la resistencia a la compresión uniaxial y la permeabilidad del concreto poroso

Procedencia del agregado grueso

El cuadro 9 resume los resultados de resistencia a la compresión uniaxial y de permeabilidad de las mezclas de concreto permeable de acuerdo con la procedencia del agregado grueso. En el caso de la resistencia a la compresión uniaxial, el agregado de río presenta valores mayores que el agregado de cantera. Este comportamiento era esperado y se debe a que las mezclas con agregados de río presentan menores contenidos de vacíos y mayor cantidad de superficies de contacto de la matriz de agregado, lo cual genera mayor trabazón y mejores resistencias a la compresión uniaxial.

En el caso de la permeabilidad no se observa ninguna diferencia significativa entre el uso de uno y otro agregado para las dosificaciones utilizadas en este estudio.

Tamaño máximo del agregado grueso

En esta investigación fueron utilizados 3 tamaños máximos: 9,5 mm, 12,0 mm y 16,0 mm. La tendencia observada fue que conforme aumenta el tamaño máximo del agregado, disminuye la resistencia del concreto permeable. Situación opuesta ocurre en términos de la permeabilidad donde a mayor tamaño máximo del agregado grueso, se obtiene también una mayor permeabilidad del concreto.

Cuadro 6 Porcentaje de resistencia promedio esperado a distintas edades

Edad (días)	% de resistencia	Desviación estándar
0	0	0
3	80	15
7	84	13
28	100	15
56	101	18

Cuadro 7 Permeabilidad promedio para las mezclas de concreto permeable mediante el modelo de carga variable y el modelo de carga constante

Mezcla	Permeabilidad				CV/CC
	Carga constante (CC)		Carga variable (CV)		
	k_{cp} (cm/s)	k_{cp} (L/min)	k_{cp} (cm/s)	k_{cp} (L/min)	
Mínimo	1.27	761	1.80	1083	131%
Máximo	1.77	1059	2.44	1467	160%
Promedio	1.50	899	2.16	1299	146%
Desviación estándar	0.13	79.4	0.25	149	10%
Coefficiente de variación (%)	9	9	12	12	7

Relación agregado grueso/cemento (AG/c)

El rango de relaciones AG/c analizado en esta investigación (3,7 hasta 4,7) no muestra una influencia importante con respecto a la resistencia o a la permeabilidad. Sin embargo, la tendencia observada fue que a mayor relación AG/c, la resistencia decae, mientras que la permeabilidad no varía de forma apreciable con la relación AG/c en el rango estudiado. En estudios donde se han utilizado relaciones AG/c entre 2/1 y 8/1 la tendencia observada es que la permeabilidad aumenta con aumentos en esta relación. Sin embargo, las resistencias a la compresión uniaxial del concreto permeable para relaciones AG/c superiores a 5/1 suelen ser muy bajas y no se recomiendan relaciones superiores a este valor.

Relación agua/cemento (w/c)

La resistencia a la compresión uniaxial del concreto permeable en el rango de relaciones w/c estudiado presenta una tendencia similar a la del concreto convencional. Los resultados obtenidos se resumen en la figura 3, en la que se observa que relaciones w/c entre 0,28 y 0,31 presentaron resistencias adecuadas. La permeabilidad presenta una disminución con el aumento de la relación w/c pero no es importante y se recomienda el uso de este material como parte de sistemas de manejo de la escorrentía superficial (ver cuadro 8).

Comparación de la permeabilidad del concreto en estudio con respecto a un evento de lluvia de muy alta intensidad en distintos lugares del Valle Central

Cuadro 8

Permeabilidad de las muestras de concreto permeable (- k_{cp})	Valor		(cm/s)	(L/min)
	Mínimo		1.27	761
	Máximo		1.77	1059
	Promedio		1.50	899
Estación	Intensidad ^a		(cm/s) x10 ⁻²	(L/min)
	San José	245	0.68	4.1
	Sabanilla	221	0.61	3.7
	Aeropuerto	317	0.88	5.3
	Santa Lucía	354	0.98	5.9

^a Datos de lluvia correspondientes a un evento con una duración de 5 minutos y un período de retorno de 100 años. (Fuente: Murillo, 1994)

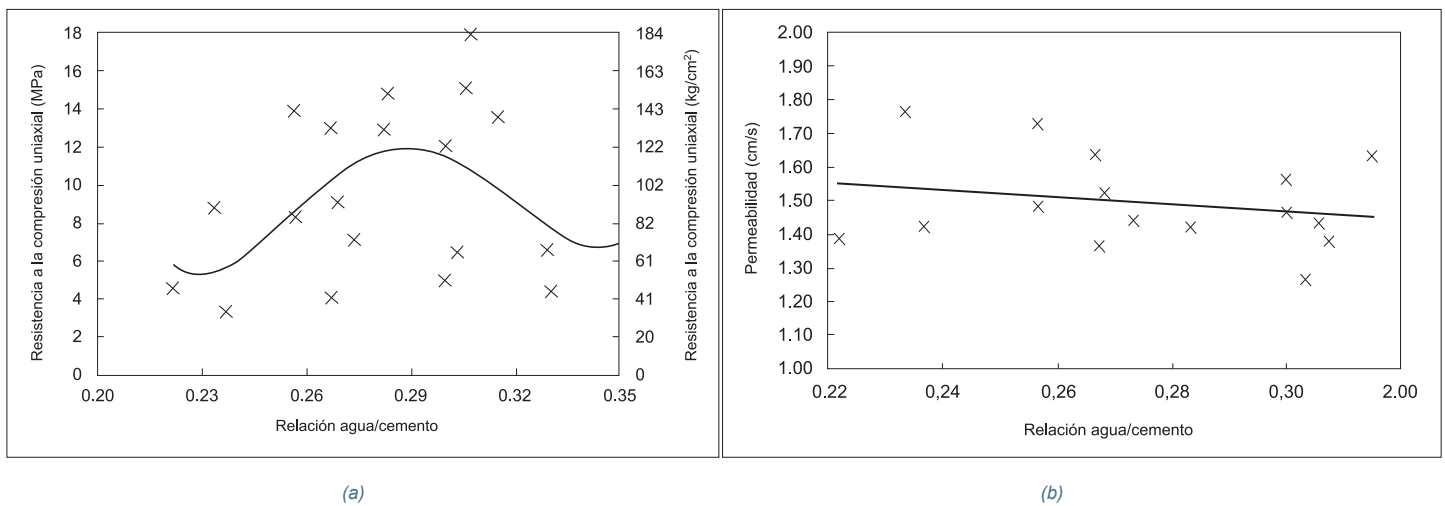
Comparación de valores de resistencia a la compresión según la procedencia del agregado grueso

Cuadro 9

		Procedencia	
		Río	Cantera
Resistencia	Promedio	10.5	5.30
	Mínima	3.33	4.12
	Máxima	17.8	7.16
	Dev. estándar	4.31	1.67
Permeabilidad (cm/s)	Promedio	1.50	1.49
	Mínima	1.27	1.39
	Máxima	1.77	1.63
	Dev. estándar	0.14	0.13

Variación de (a) la resistencia a la compresión uniaxial y (b) la permeabilidad del concreto permeable, según la relación w/c

Figura 3



Variación de la resistencia a la compresión uniaxial del concreto permeable con respecto a su permeabilidad

Con base en las mezclas diseñadas en este estudio se determinó que la resistencia a la compresión uniaxial del concreto permeable aumenta con disminuciones en la permeabilidad. En los apartados anteriores se mostró que la tendencia general es que las variables que afectan positivamente a la resistencia a la compresión uniaxial del concreto permeable, lo hacen de forma negativa con la permeabilidad. El balance adecuado entre permeabilidad y resistencia del concreto poroso se logra mediante un balance adecuado de las proporciones utilizadas para diseñar la mezcla.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los resultados obtenidos en este estudio indican que el concreto permeable es un material cuya resistencia y permeabilidad dependen de la influencia de ciertas variables. Por lo general, las variables que afectan de forma positiva la resistencia del material, lo hacen de forma negativa con la permeabilidad. Para el rango de propiedades utilizado en este estudio, la permeabilidad no presentó una disminución que impida el uso del material como parte de sistemas de manejo de la escorrentía superficial en aplicaciones de tránsito liviano (estacionamientos, ciclovías, aceras etc.). En el cuadro 10 se presentan los valores recomendados para el diseño de mezclas en Costa Rica.

Cuadro 10 Valores recomendados para el diseño de mezclas de concreto permeable en Costa Rica

Parámetro	Recomendado
AG/c	4/1 - 4.5/1
w/c	0.28 - 0.30
AF/AG	< 10 %
Plastificante	2 - 3 cm ³ /kg de cemento
T ^{máx}	12 mm
Procedencia	río

El efecto de la relación agregado fino/agregado grueso debe determinarse por medio de otra investigación. El uso de un 8% de AF con respecto al AG presentó resultados adecuados y mejoró las características del concreto permeable en estado fresco y endurecido. Sin embargo, el uso de finos está limitado eventualmente podrían presentar un efecto negativo considerable en la permeabilidad.

La pérdida de resistencia en núcleos de concreto permeable durante el proceso de extracción también debe estudiarse. Los resultados obtenidos sugieren que el porcentaje de aceptación de núcleos de concreto permeable no debería ser igual al utilizado en concreto convencional.

Finalmente, el efecto de la energía de compactación debe analizarse para los rangos de propiedades utilizados en esta investigación, con el fin de determinar el efecto que mayor energía de compactación tenga sobre la resistencia a la compresión uniaxial y la permeabilidad del concreto poroso.

REFERENCIAS

- American Concrete Institute Committee 318.** 318R-08: Building Code Requirements for Structural Concrete. Detroit, MI: American Concrete Institute. 2008.
- American Concrete Institute Committee 522.** 522R-06: Pervious Concrete. Detroit, MI: American Concrete Institute. 2006.
- American Society for Testing and Materials.** ASTM C 31-06: Standard Test Method for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Field. Pennsylvania: ASTM. 2006.
- American Society for Testing and Materials.** ASTM C 39-01: Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens. Pennsylvania: ASTM. 2002.
- Crouch, L., Cates, M., Dotson, J., Honeycutt, K., Badoe, D.** Measuring the Effective Air Void Content of Portland Cement Pervious Pavements. Cement, Concrete, and Aggregates, Vol. 25, No. 1. United States: ASTM. 2003.
- Crouch, L., Smith, N., Walker, A., Dunn, T., & Sparkman, A.** Determining Pervious PCC Permeability with a Simple Triaxial Flexible – Wall Constant Head Permeameter. United States: Tennessee Concrete Association. 2005.
- Crouch, L., Smith, N., Walker, A., Dunn, T., & Sparkman, A.** Pervious PCC Compressive Strength in the Laboratory and the Field: The Effects of Aggregate Properties and Compaction Effort. United States: Tennessee Concrete Association. 2005.
- Crouch, L., Sparkman, A., Dunn, T., & Hewitt, R.** (Estimating pervious PCC pavement design with compressive strength and effective air void content.) United States: National Ready Mixed Concrete Association. 2006.
- Fernández, L., Vitola, L., Salminci, P.** (Estado del arte en el uso de hormigones porosos.) Argentina: Instituto del Cemento Portland. 2001.

10. **Fernández, R.** Concreto Permeable: Diseño de mezclas para evaluar su resistencia a la compresión uniaxial y su permeabilidad. Informe de proyecto de graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica. 2008.
11. **Ministerio de Economía, Industria y Comercio.** RTCR 383, Cemento hidráulico, especificaciones. Costa Rica. Periódico La Gaceta. 2004.
12. **Mulligan, A.** Attainable compressive strength of pervious concrete paving systems. United States: University of Central Florida. 2005.
13. **Murillo, R.** Estudio de intensidades de lluvia en la cuenca del Río Virilla. Informe de proyecto de graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica. 1994.
14. **National Concrete Pavement Technology Center.** Mix design development for pervious concrete in cold weather. United States: Center for Transportation, Iowa State University. 2006.
15. **Neithalath, N., Weiss, J., Olek, J.** Characterizing Enhanced Porosity Concrete using electrical impedance to predict acoustic and hydraulic performance. Cement and Concrete Research. United States: Science Direct. 2006.
16. **Neithalath, N., Weiss, J., Olek, J.** Predicting the permeability of Pervious Concrete (Enhanced Porosity Concrete) from Non-Destructive Electrical Measurements. United States: Purdue University. 2006.
17. **Tennessee ReadyMixed Concrete Association.** Preliminary specifications for Portland cement pervious concrete pavement. United States. 2005.