

Effect of recycled materials and compaction methods on the mechanical properties and solar reflectance index of pervious concrete

Efecto del uso de materiales reciclados y métodos de compactación en las propiedades mecánicas e índice de reflectancia solar del hormigón permeable

Cristian Gaedicke^{1*}, Armando Marines**, Luis Mata***, Farel Miankodila*

* California State University, East Bay. USA

** Center of Technological Innovation for Construction, Holcim. MEXICO

*** University of Toledo, Toledo. USA

Fecha de Recepción: 30/10/2015

Fecha de Aceptación: 20/11/2015

PAG 159-167

Abstract

This research project evaluated the effect of using recycled aggregate and ground granulated slag on pervious concrete specimens compacted using two different methods: fixed energy and fixed porosity. The permeability, compressive strength, and solar reflectance index were analyzed. When compacted to a fixed target porosity of 20%, mixtures using recycled aggregate had, on average, 12% less strength than virgin aggregate mixtures. The use of slag did not negatively affect permeability, or compressive strength and yet was useful in improving the solar reflectance index in mixtures made with limestone aggregate. Recycled aggregate mixtures exhibited a significantly higher solar reflectance index compared to the mixtures using virgin aggregates.

Keywords: Pervious concrete, recycled concrete aggregate, ground granulated blast-furnace slag, solar reflectance index, sustainability

Resumen

En este proyecto de investigación se evalúa el efecto de los agregados reciclados y escoria de alto horno en diferentes probetas de hormigón permeable (poroso) sujetas a dos métodos de compactación: energía de compactación fija y porosidad fija. Se analizaron la permeabilidad, resistencia a la compresión e índice de reflectancia solar. En probetas compactadas a una porosidad fija del 20%, se observa que las mezclas que usan agregado reciclado poseen en promedio un 12% menos de resistencia a la compresión en comparación con las mezclas preparadas con agregado virgen. El uso de escoria de alto horno no afectó negativamente la permeabilidad o resistencia a la compresión y mejoró el índice de reflectancia solar en el hormigón con agregado calcáreo. Los hormigones con agregado reciclado presentaron mejores índices de reflectancia solar en comparación a los fabricados con agregado virgen.

Palabras clave: Hormigón permeable, hormigón poroso, agregado reciclado, escoria de alto horno, índice de reflectancia solar, sostenibilidad

1. Introducción

Desde hace más de veinte años, en los EE.UU. se ha estado usando con éxito el hormigón permeable (poroso) como un material que posee un manejo de aguas lluvias amigable con el medioambiente (Ghafoori 1995, American Concrete Institute 2006, de Solminihac et al., 2007). Los beneficios del manejo de aguas lluvia del hormigón permeable están ampliamente reconocidos por los sistemas de manejo de edificios ecológicos como, por ejemplo, los del Liderazgo en Energía y Diseño Medioambiental del Consejo Estadounidense de Arquitectura Sostenible (LEED, 2013), que reconoce la importancia de reducir las superficies no absorbentes y el escurrimiento de las aguas lluvias y promover su infiltración en esos lugares. Diversos estudios han evaluado otros beneficios del hormigón permeable, como reducción del ruido, propiedades de purificación de las aguas y mitigación del efecto Isla de Calor urbano (Schaefer et al., 2009). En consecuencia, el uso de hormigón

permeable en playas de estacionamientos, por ejemplo, tiene el potencial de disminuir los diversos efectos negativos que provoca el hormigón en el medioambiente, especialmente en las zonas urbanas

Las características termofísicas de un pavimento juegan un papel importante sobre sus efectos en el medioambiente, principalmente en zonas urbanas debido al efecto Isla de Calor. Las investigaciones sobre pavimentos convencionales (Deo and Neithalath, 2011; Gui et al., 2007) han demostrado que las propiedades como la reflectividad (albedo) y la emisividad tienen efectos positivos importantes sobre las temperaturas máximas y mínimas del hormigón. Estudios recientes (Marceau and VanGeem, 2007; Boriboomsomsin and Reza, 2007) han demostrado que el uso de escoria aumenta la reflectancia solar de los pavimentos convencionales. El uso de superficies reflectantes también se menciona en los sistemas de calificación de edificios ecológicos (LEED, 2013). Los estudios relacionados con el efecto del hormigón permeable sobre la temperatura del pavimento (Kevern et al., 2009) indican que la reflectancia solar tiene un efecto sinérgico cuando se combina con otras propiedades, como el efecto refrigerante generado por la

¹ Autor de Correspondencia:

Profesor Asistente, School of Engineering, California State University, East Bay. Estados Unidos.

E-mail: cristian.gaedicke@csueastbay.edu



pérdida de humedad en un sistema de pavimentos permeable y la menor capacidad de almacenamiento calórico del pavimento permeable.

La incorporación de materiales de desecho en las mezclas de hormigón permeable tiene la capacidad de mejorar los beneficios medioambientales del hormigón permeable sin afectar significativamente sus propiedades físicas y mecánicas. Se ha empleado árido de hormigón reciclado en las mezclas de hormigón permeable para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, ya que exige menor extracción y tratamiento que los agregados vírgenes (U.S. Environmental Protection Agency, 2003). Li et al. (2009) y Rizvi et al. (2010) concluyeron que una sustitución del 15% de agregado virgen por agregado de hormigón reciclado no afecta la trabajabilidad o las propiedades mecánicas de estas mezclas. Butler et al. (2013) compararon las mezclas de hormigón permeable usando agregado virgen y reciclado y concluyeron que las mezclas tenían una resistencia equivalente, aunque aquellas preparadas con hormigón reciclado tenían menor energía de fractura. Bhutta et al. (2013) descubrieron que el hormigón permeable preparado con agregado reciclado tenía una razón vacíos/permeabilidad al agua mayor. Su investigación, además, demostró que las mezclas con agregados reciclados tenían una resistencia a la compresión levemente menor.

Otra forma de mejorar la sostenibilidad de los pavimentos permeables es el uso de materiales cementicios suplementarios tales como la escoria granulada de alto horno (GGBFS, por su sigla en inglés). Por ejemplo, la investigación sobre hormigones convencionales (Prusinski et al., 2006) ha demostrado que el reemplazo de un 35% a 50% de cemento por escoria puede ayudar a reducir las emisiones de CO₂ entre un 29% y 46%, respectivamente. Investigaciones recientes sobre el uso GGBFS en hormigones permeables (Sriravindrarah et al., 2012) señalan que no existen efectos negativos sobre la resistencia a la compresión de las mezclas en que se reemplazó un 70% del cemento por GGBFS. Además, la escoria tiene la capacidad de mitigar el efecto Isla de Calor, mejorando la reflectividad solar de los pavimentos de hormigón.

2. Objetivo de la investigación

El objetivo de este estudio era evaluar el efecto que produce la incorporación de grandes contenidos de materiales reciclados en el hormigón para mejorar sus propiedades medioambientales sin afectar significativamente su comportamiento. Específicamente, se investigó el uso de un porcentaje alto (50%) de agregado de hormigón reciclado y el reemplazo de hasta un 30% de cemento por escoria granulada de alto horno. Se evaluó el efecto de los materiales reciclados bajo dos métodos distintos de compactación,

porosidad fija y energía de compactación fija, para determinar cuál de los métodos de compactación tenía mejor comportamiento bajo estas condiciones. Se midieron las siguientes propiedades: porosidad, permeabilidad, resistencia a la compresión e Índice de Reflectancia Solar (SRI) de las mezclas de hormigón permeable preparadas.

3. Programa experimental

3.1 Materiales

En este estudio, se usaron tres tipos de agregados gruesos, con un tamaño nominal de 9,5 mm (3/8 pulg.). La Tabla 1 resume las propiedades de cada uno de los agregados. La gravilla y piedra caliza se obtuvieron localmente, en la zona central de Texas, EE.UU. La mezcla de agregado de hormigón reciclado (RCAB, por su sigla en inglés) se preparó mezclando un 50% de agregado de piedra caliza virgen triturada y un 50% de agregado de hormigón reciclado. Se usó cemento Portland Tipo I. La escoria granulada de alto horno, un subproducto de la fabricación del acero, fue seleccionada específicamente para este estudio de acuerdo con las investigaciones que demostraban su capacidad para mejorar la resistencia y aumentar la reflectividad solar (Boriboosomsin and Reza, 2007). La escoria tenía una finura de Blaine de 560,5 m²/kg (835,7 pie²/lb) y un índice de actividad de la escoria a 7 y 28 días de 98 y 123, respectivamente, y cumplía con los requisitos químicos y físicos de la ASTM C989 (2012a). Se usó un aditivo reductor de agua de rango medio (ASTM C 494/C 494M tipo A) y un aditivo modificador de la viscosidad (ASTM C 494/C 494M tipo S) con una dosificación de 392 y 261 ml/100 kg (6 y 4 fl oz/cwt) de material cementicio, respectivamente.

3.2 Dosificación de las mezclas

Se prepararon dos series de mezclas como se describe en la Tabla 2. La Serie I consistía en nueve mezclas con un contenido medio de pasta de cemento (razón agregado/pasta de 5.2). El conjunto consistía en una mezcla de control por tipo de agregado y dos niveles de reemplazo de cemento por GGBFS por agregado. Estas mezclas se prepararon para evaluar el potencial de sostenibilidad del uso de materiales reciclados en el hormigón permeable.

Se preparó un grupo adicional de mezclas (Serie II) para evaluar el efecto del contenido de pasta de cemento en las propiedades del hormigón permeable. Cuatro mezclas preparadas con piedra caliza y RCAB tenían un mayor contenido de pasta (razón agregado/pasta de 4.5), y tres mezclas de gravilla tenían un menor contenido de pasta (razón agregado/pasta de 6.0). En todas las mezclas, se mantuvo constante el tipo de cemento (Tipo I), la razón agua/materiales cementicios (0.30) y el tamaño de los agregados (9.5 mm; 3/8 pulg.).

Tabla 1. Propiedades físicas de los agregados

Propiedad	Unidad	Gravilla	Piedra caliza	RCAB
Unidad de peso	kg/m ³	1,588	1,471	1,411
Absorción de agua	%	0.95	2.47	4.12
Gravedad Específica a Granel _{ssd} ^a	-----	2.61	2.57	2.42
Gravedad Específica a Granel _{od} ^b	-----	2.59	2.50	2.32
Vacíos	%	38.48	41.15	41.57

^assd, condición superficie seca saturada

^bod, condición secada al horno



3.3 Preparación y compactación de las probetas

Cada una de las mezclas de hormigón permeable se preparó en una mezcladora de tambor giratorio de 85 litros (3 pies³) de capacidad, mezclando primero los agregados, cemento y escoria durante un minuto, como sugieren Kevern et al. (2005). Después, se agregó el agua junto con el aditivo reductor de agua de rango medio y se mezcló durante tres minutos. Se dejó reposar el hormigón durante un minuto y luego se mezcló nuevamente durante tres minutos mientras se agregaba el aditivo modificador de viscosidad a la mezcla.

Se fabricaron probetas cilíndricas para determinar la porosidad, permeabilidad y resistencia. Las mezclas fueron vaciadas en moldes plásticos de 100mm de diámetro por 200mm de alto (4 pulg. x 8 pulg.) y compactadas en dos capas usando un martillo Proctor de 2,5kg (5,5 lb) con una caída de 305 mm (1 pie). Cada muestra de ensayo estaba compuesta por 3 probetas cilíndricas. En esta investigación, se usaron dos sistemas de consolidación, porosidad fija y energía de compactación fija, con el fin de comparar los resultados entre las muestras usando diferentes tipos de materiales y dosificaciones y, además, analizar el efecto que produce la energía de compactación sobre las propiedades del hormigón permeable.

El primer criterio aplicado fue el de porosidad fija, que requiere que las probetas sean compactadas varias veces para alcanzar una porosidad del 20%. La porosidad se controló colocando una cantidad fija (en peso) de material en el cilindro de hormigón. La consolidación varió a través de las mezclas, desde los 45 KN*m/m³ a los 242 KN*m/m³ (5 a 30 golpes del martillo Proctor, respectivamente). Las mediciones de la energía de compactación requerida para alcanzar una porosidad fija también es un parámetro útil para comparar las necesidades de compactación de las diferentes mezclas en el laboratorio y para su posible uso en terreno.

El segundo criterio fue el de energía de compactación fija, en el que se aplicó una cantidad constante de energía de compactación a cada cilindro, esto es, 20 caídas del martillo Proctor por capa (181 KN*m/m³). Como se esperaba, la porosidad de las probetas compactadas bajo este criterio tuvo una mayor variación, desde un 12% a un 23%. El análisis de este criterio de compactación es importante para evaluar las repercusiones que tiene en la permeabilidad y resistencia el hecho de usar la misma cantidad de energía de compactación (es decir, un número fijo de pasadas de rodillo) independientemente de la mezcla de hormigón, que en ciertos casos constituye la práctica en terreno.

Para evaluar el Índice de Reflectancia Solar (SRI) del hormigón permeable se cortaron probetas de una losa que medía 432mm por 356mm por 102mm de alto (17 pulg. x 14 pulg. x 4 pulg.). La losa fue compactada en una capa usando un rodillo a una presión constante de 148 kg/m (100 lb/pie) (Mahboub et al., 2009). Se usó el rodillo para asegurarse de que el método de acabado superficial fuera lo más parecido posible al usado normalmente en terreno.

Los cilindros se cubrieron con tapas plásticas y las losas se cubrieron con una lámina plástica ajustada para evitar la pérdida de humedad. Todas las probetas fueron desmoldadas al cabo de 24 horas y colocadas en una sala de curado con una humedad del 98% durante 28 días. Las losas se cortaron usando una sierra para hormigón refrigerada por agua como lo establece la norma ASTM C42 para obtener muestras (losetas) de 125 mm por 83 mm por 102 mm de alto (5 pulg. x 3 pulg. x 4 pulg.) aproximadamente.

Tabla 2. Dosificación de las mezclas

Serie No.	Tipo de agregado	Mezcla No.	Contenido de escoria	Razón agregado/pasta	Agregado (kg/m ³)	Cemento (kg/m ³)	Escoria (kg/m ³)	Agua (kg/m ³)	
<i>Mezclas con contenido medio de pasta</i>									
I	Gravilla	G-0	0%	5.2	1453	284	-	85	
		G-15	15%		1453	242	43	85	
		G-30	30%		1453	199	85	85	
	Piedra caliza	L-0	0%	5.2	1453	284	-	85	
		L-15	15%		1453	242	43	85	
		L-30	30%		1453	199	85	85	
	RCAB	R-0	0%	5.2	1453	284	-	85	
		R-15	15%		1453	242	43	85	
		R-30	30%		1453	199	85	85	
<i>Mezclas con bajo contenido de pasta</i>									
II	Gravilla	G-0 LP	0%	6.0	1643	276	-	82	
		G-15 LP	15%		1643	233	42	82	
		G-30 LP	30%		1643	193	82	81	
	<i>Mezclas con alto contenido de pasta</i>								
	Piedra caliza	L-0 HP	0%	4.5	1519	334	-	101	
		L-15 HP	15%		1519	284	50	100	
L-30 HP		30%	1519		234	100	100		
RCAB	R-15 HP	15%	4.5	1519	307	54	108		

NOTE: HP=Alto contenido de pasta, LP=Bajo contenido de pasta, MP=Contenido medio de pasta



3.4 Procedimientos de ensayos

Resistencia a la compresión: Los ensayos de resistencia a la compresión se realizaron de acuerdo a la ASTM C39 (2012b). Todos los cilindros fueron recapados con azufre antes de ser ensayados.

Porosidad: Se midieron las dimensiones, peso secado al aire y peso sumergido de cada cilindro. Se calculó la porosidad según el procedimiento propuesto por Montes et al. (2005). Todas las muestras se dejaron secar al aire durante 24 horas bajo condiciones de laboratorio y se midieron las dimensiones exactas de cada cilindro.

Permeabilidad: Se usó un aparato de ensayo de permeabilidad de carga variable para medir la permeabilidad de los cilindros de hormigón (Kevern et al., 2005). Los cilindros de hormigón se cubrieron cuidadosamente con una membrana de espuma de polietileno flexible para evitar la infiltración de agua entre la superficie de la probeta y el aparato. En dos alturas diferentes, se registró el tiempo infiltración del agua a través de la probeta. El nivel inicial y

final se fijó a los 50 cm y 25 cm, respectivamente. Por último, se determinó el coeficiente promedio de permeabilidad usando la Ley de Darcy que supone un flujo laminar.

Índice de Reflectancia Solar (SRI): El uso de materiales de construcción de colores claros y altamente reflectantes reduce la cantidad de energía solar que es absorbida por la infraestructura urbana y constituye una práctica común para reducir el efecto Isla de Calor (Marceau and VanGeem, 2007). El SRI es un método que evalúa la emitancia térmica y la reflectancia solar de las superficies. La reflectancia solar representa la fracción de radiación solar incidente sobre una superficie que es reflejada desde la superficie. El índice de reflectancia solar fue determinado en tres lugares ubicados al azar en la superficie superior de cada muestra prismática (Figura 1b) obtenida previamente de las losas. Se usó un reflectómetro solar portátil (Figura 1a) de acuerdo a la ASTM C 1549. Se ensayó un conjunto de tres probetas por cada mezcla, y se determinó el SRI de acuerdo con la ASTM E 1980 – 01.



Figura 1. Ensayo de reflectancia solar; (a) Reflectómetro de espectro solar, (b) Muestras de ensayo

4. Resultados y discusión

4.1 Energía de compactación

Para todos los cilindros, se registró el número de golpes necesarios del martillo Proctor para alcanzar una porosidad del 20% y luego, este número se usó para calcular la energía de compactación para cada mezcla. Los resultados revelaron que la energía de compactación necesaria para alcanzar el 20% de porosidad se ve afectada por el tipo de agregado y contenido de pasta de cemento de la mezcla. Por ejemplo, en mezclas con un contenido medio de pasta de cemento, la cantidad de energía de compactación aplicada a la gravilla fue un 52% menor que la necesaria para una mezcla preparada con agregados calcáreos para obtener la misma porosidad. Esta diferencia se puede explicar por la forma redondeada de la gravilla, que facilita el flujo de sus partículas, mientras que el agregado triturado, como la piedra caliza, requiere más energía para fluir. Las mezclas que usan RCAB resultaron más trabajables y requirieron sólo el 61% de la energía de compactación para alcanzar el 20% de porosidad en comparación con las mezclas preparadas con piedra caliza. Además, la comparación entre las partículas de agregados de RCAB y piedra caliza demostraron que esta última era más angular, lo que podría haber aumentado la trabazón de los agregados, disminuyendo su compactabilidad. En contraste, el uso de escoria no tuvo un efecto estadísticamente significativo en la energía de compactación necesaria para alcanzar el 20% de porosidad.

Se analizó el efecto de la pasta de cemento sobre la energía de compactación requerida para una porosidad fija. Se observó que la porosidad del 20% podía alcanzarse con un 72% menos de energía de compactación en las mezclas

con piedra caliza, con un mayor contenido de pasta de cemento (razón agregado/pasta de 4.5) comparadas con las mezclas preparadas un contenido medio de pasta de cemento (razón agregado/pasta de 5.2). En cambio, las mezclas preparadas con gravilla, con un menor contenido de pasta de cemento (razón agregado/pasta de 6,0) requirieron un 44% más de energía de compactación comparadas con las mezclas preparadas con un contenido medio de pasta de cemento

4.2 Permeabilidad

Probetas con porosidad fija: Se midió la permeabilidad para todas las mezclas compactadas a una porosidad fija del 20%. Como se aprecia en la Figura 2a, las mezclas con gravilla y piedra caliza con un contenido medio de pasta de cemento tuvieron una permeabilidad similar de $k=0.67 \pm 0.13$ cm/s y $k=0.60 \pm 0.18$ cm/s, respectivamente. Esta diferencia de 0,07 cm/s se encuentra dentro de la variabilidad del ensayo y, por lo tanto, no es estadísticamente significativa. En cambio, la permeabilidad para las mezclas con RCAB (0.89 ± 0.14 cm/s) resultó mayor que para los agregados vírgenes, lo que podría asociarse a una mayor interconectividad de los huecos en las mezclas con RCAB debido a la menor energía de compactación requerida (comparada con las mezclas preparadas con agregado calcáreo) para alcanzar la porosidad fija. Las variaciones en escoria no tuvieron un efecto significativo en la permeabilidad medida. La permeabilidad no se vio significativamente alterada cuando se usó un menor contenido de pasta de cemento en las mezclas de gravilla, aunque el uso de un mayor contenido de pasta en las mezclas de piedra caliza redujo levemente la permeabilidad del material.

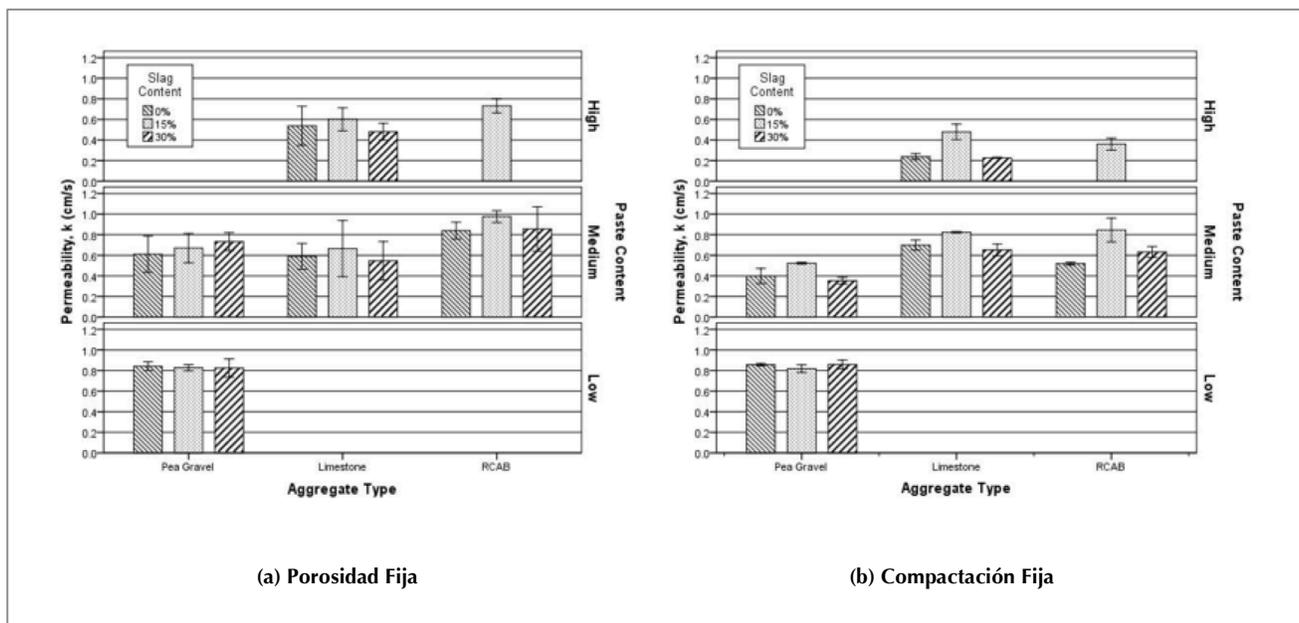


Figura 2. Resultados de la permeabilidad para (a) en probetas compactadas para alcanzar una porosidad del 20% y (b) probetas compactadas con 20 golpes de martillo Proctor por capa



Probetas con energía de compactación fija: La permeabilidad de las muestras sometidas a una energía de compactación constante (esto es, 20 caídas del martillo Proctor por capa) varió de 0.26 cm/s a 0.89 cm/s, como se aprecia en la Figura 2b. Para las mezclas con contenido medio de pasta de cemento, la permeabilidad de las mezclas de gravilla fue un 40% menor al de las mezclas con piedra caliza, en línea con su menor porosidad medida. En contraste, la permeabilidad de las mezclas de RCAB y piedra caliza fue parecida a pesar del hecho de que la porosidad de las mezclas con RCAB fue menor. Como se esperaba, el contenido de pasta de cemento tuvo un efecto en la permeabilidad de las mezclas de hormigón permeable sometidas a una energía de compactación constante. Las mezclas de hormigón con piedra caliza con mayor contenido de pasta de cemento tuvieron una permeabilidad del 56% menor, lo que se correlaciona con su 33% de mayor porosidad. El opuesto resultó cierto en mezclas de gravilla con bajo contenido de pasta de cemento, que demostraron una mayor capacidad de infiltración de agua con un valor de permeabilidad promedio de 0,84 cm/s. Este hallazgo confirma que la permeabilidad está altamente influenciada por la porosidad de las mezclas, pero además demuestra que deberían considerarse otros factores, como el tipo de agregado, para alcanzar la permeabilidad deseada (Crouch et al., 2007).

4.3 Resistencia a la compresión

Probetas con porosidad fija: La Figura 3a muestra el efecto del tipo de agregado, escoria y contenido de pasta de cemento en la resistencia a la compresión para todas las

mezclas compactadas a una porosidad fija del 20%. Los resultados de las resistencias a la compresión para un contenido medio de pasta de cemento (razón pasta/agregado de 4.5) muestran una diferencia promedio entre las mezclas de gravilla y piedra caliza de sólo un 2.4%. Por comparación, la resistencia promedio a la compresión de las mezclas preparadas con piedra caliza y RCAB fue un 12% menor a la de piedra caliza. El uso de escoria no generó diferencias significativas en la resistencia a la compresión para las mezclas con una porosidad fija del 20%. Este hallazgo se confirma en la Figura 3a, que muestra que la resistencia a la compresión se mantiene prácticamente invariable a medida que aumenta el contenido de escoria. El contenido de pasta de cemento tiene un efecto moderado en la resistencia a la compresión de las mezclas. Por ejemplo, los valores de resistencia a la compresión para las mezclas con gravilla con bajo contenido de pasta (14.09 ± 1.54 MPa) fueron un 11% menor que los medidos en las mezclas de piedra caliza con un contenido medio de pasta de cemento (15.83 ± 2.92 MPa). La resistencia a la compresión para las mezclas de piedra caliza con un contenido alto (14.94 ± 1.85 MPa) y medio (16.20 ± 2.28 MPa) de pasta aumentó en un 8%. El análisis confirma que, bajo condiciones de porosidad controlada, existe una diferencia despreciable en la resistencia a la compresión de las mezclas preparadas con agregados vírgenes (gravilla y piedra caliza). Sin embargo, el uso de RCAB puede reducir la resistencia a la compresión en alrededor de un 12%, y el aumento o disminución del contenido de pasta de cemento puede aumentar o disminuir la resistencia en aproximadamente un 8 a 12%.

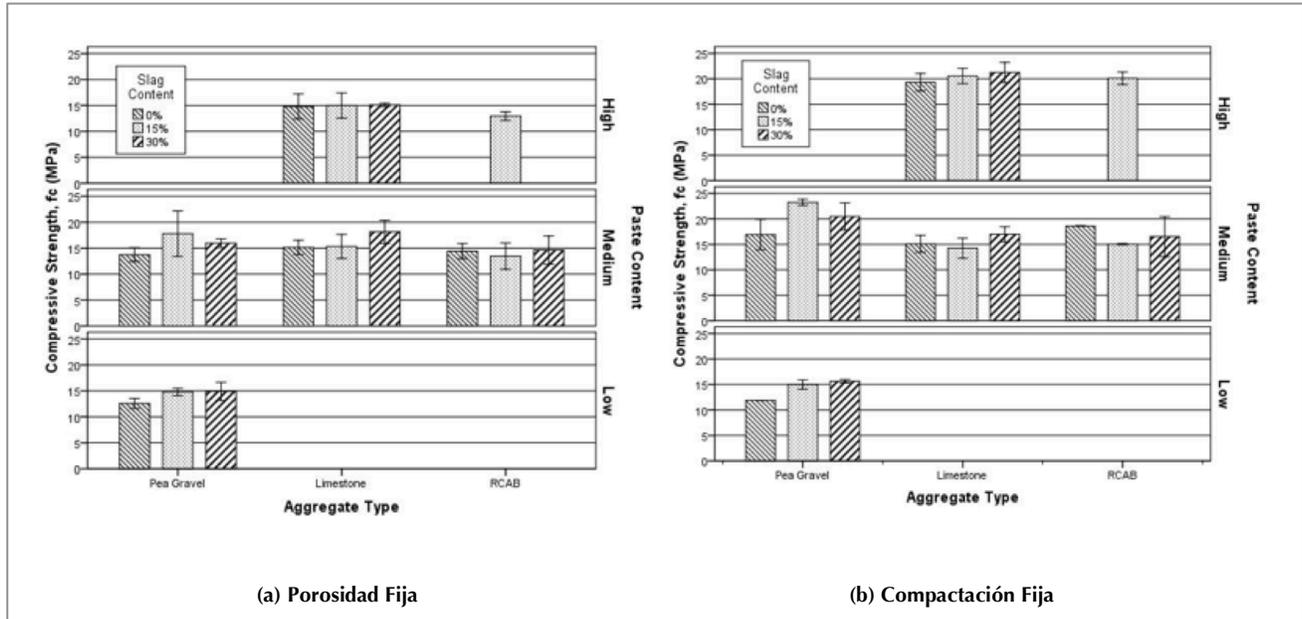


Figura 3. Resultados de la resistencia a la compresión para (a) muestras compactadas para alcanzar una porosidad del 20% y (b) muestras compactadas con 20 golpes de martillo Proctor por capa



Probetas con energía de compactación fija: La Figura 3b muestra los resultados de las resistencias a la compresión para las diferentes mezclas cuando se mantiene constante la energía de compactación (esto es, 20 golpes de martillo Proctor por capa) y, en consecuencia, la porosidad de las mezclas es diferente. Estos resultados confirman las investigaciones realizadas por Deo y Neithalath (2011), Neptune y Putman (2010), y Mulligan (2005), que establecen que la porosidad es una de las propiedades clave que afecta a la resistencia a la compresión. Por ejemplo, las mezclas preparadas con un contenido medio de pasta y gravilla tuvieron, en promedio, una resistencia 24% mayor a la de las mezclas preparadas con piedra caliza, lo que se relaciona estrechamente con su menor porosidad. Al contrario, la resistencia a la compresión de las mezclas preparadas con RCAB fue 7.6% mayor a la de las preparadas con agregado de piedra caliza, pero este resultado se relaciona directamente con el 22% de menor porosidad de las mezclas con RCAB. Estos hallazgos llevan a la conclusión que, bajo un nivel constante de energía de compactación, la facilidad de colocación y compactabilidad de la mezcla puede jugar un papel que podría ser tan influyente como la materia prima y el diseño de la mezcla para lograr una resistencia específica a la compresión.

El efecto del contenido de pasta de cemento en la resistencia a la compresión también está estrechamente relacionado con la porosidad de cada mezcla. Las mezclas con piedra caliza, con alto contenido de pasta tuvieron un 24% más de resistencia (y un 33% de menor porosidad) en comparación con aquellas con un contenido medio de pasta de cemento. En las mezclas con gravilla se aprecia un fenómeno similar, donde las mezclas con bajo contenido de pasta tenían un 30% menos de resistencia (y un 21% más de porosidad) en comparación con aquellas que tenían un contenido medio de pasta de cemento. Estos resultados, que están muy relacionados con la porosidad de las mezclas (es decir, a menor contenido de pasta, mayor porosidad y viceversa), significan que si se aplica una energía de compactación constante al hormigón permeable en terreno,

las variaciones en el contenido de pasta pueden afectar significativamente las resistencias a la compresión. Al contrario, el análisis también demostró que el uso de hasta un 30% de escoria no producía efectos negativos en la resistencia a la compresión, independientemente del tipo de agregado y de contenido de pasta de cemento

4.4 Índice de reflectancia solar (SRI)

Se midió el SRI en nueve mezclas seleccionadas, como se aprecia en la Figura 4. El uso de un 15% de escoria mejoró el SRI de las mezclas con gravilla, pero el efecto no resultó no constante cuando se usó un 30% de escoria. Si bien el color del agregado pudo ser un factor significativo en el menor SRI de esas mezclas, el hecho de que las mezclas con gravilla tuvieran un menor contenido de pasta también pudo haber reducido el potencial de la escoria para aumentar su SRI. Por lo tanto, se requiere una investigación más profunda para determinar si la gravilla genera constantemente mezclas con menor SRI y si la escoria puede mejorar esta propiedad de manera regular.

En cambio, el uso de escoria no mejoró de manera sistemática el SRI de las mezclas preparadas con agregado de piedra caliza. Como se ve en la Figura 4, solo la mezcla con piedra caliza sin reemplazo de escoria se encuentra bajo el umbral 29 del SRI. El SRI del hormigón permeable preparado con agregado de piedra caliza y 30% de escoria resultó un 38% mayor que la mezcla sin escoria. Estos resultados están en consonancia con los hallazgos de Boriboonsomsin y Reza (2007) para el hormigón convencional preparado con agregado de piedra caliza, donde un reemplazo del 70% de cemento por escoria aumentó su reflectividad en un 71%.

El SRI para las mezclas de hormigón permeable preparadas con RCAB, en promedio, fue mayor que el de aquellas preparadas con gravilla o piedra caliza. La dosificación de la escoria no afectó el SRI en las mezclas que usaron agregado reciclado. Aunque el SRI relativamente alto encontrado en las mezclas con RCAB puede estar relacionado con las características específicas del hormigón triturado usado para crear este agregado reciclado especial.

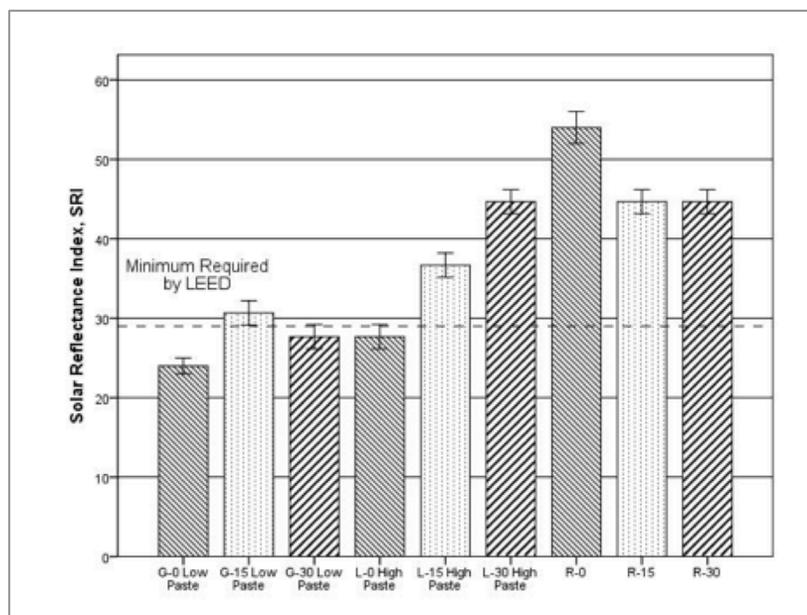


Figura 4. Índices de reflectancia solar para diferentes agregados con reemplazo incremental de escoria. Las barras de error representan una desviación estándar



5. Conclusiones

1. Las mezclas con agregados redondeados como por ejemplo, gravillas, requirieron menos energía de compactación en comparación con las preparadas con piedra caliza o RCAB. Las mezclas preparadas con agregado de RCAB requirieron menos energía de compactación que las mezclas con piedra caliza, lo que puede asociarse a la angularidad de esta última. Aunque este fenómeno puede circunscribirse a nuestro RCAB en particular, este hallazgo muestra el potencial del RCAB como un agregado que puede generar mezclas que son tan trabajables y compactables como aquellas preparadas con agregados vírgenes si se logra obtener la granulometría, medición de la capacidad de absorción de los agregados y diseño de mezcla adecuados. El contenido de pasta de cemento de las mezclas de hormigón permeable influyó en la energía de compactación requerida para lograr una porosidad constante, mientras que las dosificaciones con mayor contenido de pasta exigieron menor energía de compactación y viceversa. El uso de escoria no afectó a la energía de compactación requerida por una mezcla de hormigón permeable para alcanzar una porosidad dada.
2. El efecto del tipo de agregado y contenido de pasta de cemento en la permeabilidad se vio significativamente reducido cuando la porosidad se controló al 20%. Tanto la piedra caliza como la gravilla mostraron una permeabilidad similar, en cambio el RCAB tuvo una

mayor permeabilidad bajo dichas condiciones. Las mezclas con RCAB siguieron su porosidad medida, pero tendieron a producir una permeabilidad mayor, como lo reflejan las mezclas con RCAB y piedra caliza que mostraron casi la misma permeabilidad a pesar de que el RCAB posee menor porosidad.

3. La resistencia a la compresión de las mezclas compactadas a una porosidad fija del 20% no se vio afectada por el tipo de agregado cuando se empleó agregados vírgenes como la piedra caliza y gravilla. Al contrario, las mezclas preparadas con RCAB tuvieron una resistencia 12% menor, en promedio, señalando que el agregado reciclado puede tener un leve efecto negativo en la resistencia a la compresión. El análisis para las mezclas con diferentes contenidos de pasta demostró que, a pesar de tener la misma porosidad, un incremento en el contenido de pasta generó un incremento del 8% en la resistencia a la compresión, mientras que una reducción en el contenido de pasta redujo la resistencia a la compresión en un 12%.
4. Se encontró que el tipo de agregado afectaba al SRI; los agregados más oscuros como la gravilla exhibieron un SRI menor comparados con las mezclas preparadas con agregados de RCAB o piedra caliza. El uso de GGBFS como reemplazo del cemento en las mezclas de hormigón permeable preparadas con piedra caliza tuvo un efecto importante en el SRI, que aumentó en un 38% al reemplazar un 30% del cemento por GGBFS.

6. Referencias

- American Concrete Institute (2006)**, Pervious Concrete, ACI 522 Committee Report. Farmington Hills, MI, 2006.
- ASTM (2012a)**, Annual Book of ASTM Standards, V. 04.01, ASTM International, West Conshohocken, Pa., 2012.
- ASTM (2012b)**, Annual Book of ASTM Standards, V. 04.02, ASTM International, West Conshohocken, Pa., 2012.
- Boriboonsomsin K. and Reza F. (2007)**, Mix Design and Benefit Evaluation of High Solar Reflectance Concrete Pavements. In Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 2011, Transportation Research Board of the National Academies, Washington D.C., 2007, pp. 11-20. DOI: <http://dx.doi.org/10.3141/2011-02>
- Bhutta M., Hasanah N., Farhayu N., Hussin M., Tahir M. and Mirza J. (2013)**, Properties of porous concrete from waste crushed concrete (recycled aggregate). Construction and Building Materials. Volume 47, October 2013, pp. 1243-1248. doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.06.022
- Butler L., West J., and Tighe S. (2013)**, Effect of recycled concrete coarse aggregate from multiple sources on the hardened properties of concrete with equivalent compressive strength. Construction and Building Materials. Volume 47, October 2013, pp. 1292-1301. doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.05.074
- Crouch L.K., Pitt J. and Hewitt R. (2007)**, Aggregate Effects on Pervious Portland Cement Concrete Static Modulus of Elasticity. Journal of Materials in Civil Engineering. Volume 19, Number 7. American Society of Civil Engineers, Reston, VA. July, 2007, pp 561-568. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2007\)19:7\(561\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2007)19:7(561))
- De Solminihac H., Videla C., Fernandez B. and Castro J. (2007)**, Porous Concrete Mixtures for Pervious Urban Pavements. Materiales de Construcción. Volume 57, Issue 287. DOI:10.3989/mc.2007.v57.i287.54
- Deo O., Neithalath N. (2011)**, Compressive Response of Pervious Concrete Proportioned for Desired Porosities. Construction and Building Materials. Volume 25, Issue 11. November 2011. Pages 4181-4189. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2011.04.055
- Ghafoori N. (1995)**, Development of No-Fines Concrete Pavement Applications. Journal of Transportation Engineering, June 1995, Vol. 126, No. 3, pp 283-288. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(1995\)121:3\(283\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(1995)121:3(283))
- Gui J., Phelan P.E., Kaloush K.E. and Golden J.S. (2007)**, Impact of Pavement Thermophysical Properties on Surface Temperatures. Journal of Materials in Civil Engineering. Volume 19, Number 8. American Society of Civil Engineers, Reston, VA. August, 2007, pp 683-690. DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2007\)19:8\(683\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2007)19:8(683))
- Kevern J.T., Schaefer V.R., Wang K. and Suleiman M.T. (2005)**, Pervious Concrete Proportions for Improved Freeze-Thaw Durability. Journal of ASTM International. Vol. 5, No. 2, ASTM International, West Conshohocken, PA. February, 2005.
- Kevern J.T., Schaefer V.R. and Wang K. (2009)**, Temperature Behavior of Pervious Concrete Systems. In Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 2098, Transportation Research Board of the National Academies, Washington D.C., 2009, pp. 94-101. DOI: <http://dx.doi.org/10.3141/2098-10>
- LEED Reference Guide for Green Building Design and Construction (2013)**, 2013 Edition. U.S. Green Building Council, Washington, D.C.
- Li J. (2009)**, Mix Design of Pervious Recycled Concrete. Presented at the GeoHunan International Conference. Changsha, China, June, 2009.
- Mahboub K.C., Canler J., Rathbone R., Robl R. and Davis B. (2009)**, Pervious Concrete: Compaction and Aggregate Gradation. ACI Materials Journal. Volume 106, Number 6. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, December, 2009, pp. 523-529.



SPANISH VERSION.....

- Marceau M.L. and VanGeem M.G. (2007)**, Solar Reflectance of Concretes for LEED Sustainable Site Credit: Heat Island Effect. Research and Development Information. Serial No. 2982. Portland Cement Association, Skokie, IL, USA, 2007, 94 pages. <http://www.concretethinker.com/Content/Upload%5C446.pdf>
- Montes F., Valavala S., and Haselbach L.M. (2005)**, A New Test Method for Porosity Measurements of Portland Cement Pervious Concrete. Journal of ASTM International. Vol. 2, No. 1, ASTM International, West Conshohocken, PA. Jan. 2005, pp. 13.
- Mulligan, A. (2005)** Attainable Compressive Strength of Pervious Concrete Paving Systems. Master's Thesis, University of Central Florida, 2005. Building Simulation, Montréal, Canada, pp. 1449-145.
- Neptune A.I. and Putman B.J. (2010)**, Effect of Aggregate Size and Gradation on Pervious Concrete Mixtures. ACI Materials Journal. Volume 107, Number 6. American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, December, 2010. pp. 627-633
- Prusinski J.R., Marceau M.L. and VanGeem M. (2006)**, Life Cycle Inventory of Slag Cement Concrete. Presented at Eighth CANMET/ACI Eighth CANMET/ACI. International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete. Montreal, Canada, June 2006.
- Rizvi R., Tighe S., Henderson V. and Norris J. (2010)**, Evaluating the Use of Recycled Concrete Aggregate in Pervious Concrete Pavement. In Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 2164, Transportation Research Board of the National Academies, Washington D.C., 2010, pp. 132-140. <http://trjournalonline.trb.org/doi/pdf/10.3141/2164-17>
- Schaefer V.R., Kevern J.T., Izevbakhai B., Wang K., Cutler H.E. and Wiegand P. (2009)**, Construction and performance of pervious concrete overlay at Minnesota Road Research Project. In Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 2164, Transportation Research Board of the National Academies, Washington D.C., 2009, pp. 82-88. DOI: <http://dx.doi.org/10.3141/2164-11>
- Sriravindrarajah R., Wang N. and Ervin L. (2012)**, Mix Design for Pervious Recycled Aggregate Concrete. International Journal of Concrete Structures and Materials. Volume 6, No. 5, December 2012, pp. 239-246. <http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs40069-012-0024-x#>
- U.S. Environmental Protection Agency (2003)**, Background document for life-cycle greenhouse gas emission factors for clay brick reuse and concrete recycling. EPA No.530-R-03-017, Washington, D.C., November 7, 2003.

