



Ciencia Ergo Sum
ISSN: 1405-0269
ciencia.ergosum@yahoo.com.mx
Universidad Autónoma del Estado de México
México

Pavimentos permeables. Una aproximación convergente en la construcción de vialidades urbanas y en la preservación del recurso agua

Cárdenas Gutiérrez, Eusebio; Albiter Rodríguez, Ángel; Jaimes Jaramillo, Janner

Pavimentos permeables. Una aproximación convergente en la construcción de vialidades urbanas y en la preservación del recurso agua

Ciencia Ergo Sum, vol. 24, núm. 2, 2017

Universidad Autónoma del Estado de México, México

Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=10450491009>



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

Pavimentos permeables. Una aproximación convergente en la construcción de vialidades urbanas y en la preservación del recurso agua

Pervious Pavements. A Convergent Approach to Urban Infrastructure Construction and Water Preservation

Eusebio Cárdenas Gutiérrez
Universidad Autónoma del Estado de México, México
eusebio_cardenas@yahoo.com

Redalyc: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=10450491009>

Ángel Albiter Rodríguez
Universidad Autónoma del Estado de México, México
aira48@hotmail.com

Janner Jaimes Jaramillo
Universidad Autónoma del Estado de México, México
janner_jj@hotmail.com

Recepción: 29 Septiembre 2015
Aprobación: 14 Diciembre 2016

RESUMEN:

Se analiza el uso de los concretos permeables en la infraestructura para la movilidad urbana. En este sentido, se revisa el diseño convencional de pavimentos y se observa que está en una condición de divergencia: atiende a la resistencia, pero no a la preservación del agua. Este diseño introduce los aspectos básicos en la aplicación de los concretos permeables. Se concluye que para una movilidad urbana sustentable la utilización de concretos permeables debe ser una alternativa, ya que atienden requerimientos de infraestructura, manejo y preservación del recurso agua. En la prospectiva se plantean acciones para mejorar y ampliar las posibilidades de utilización de los pavimentos permeables.

PALABRAS CLAVE: pavimentos permeables, vialidades urbanas, movilidad.

ABSTRACT:

The purpose of this paper is to analyze the use of pervious pavements in urban mobility infrastructure. In the paper, the principles for the design of conventional concrete are reviewed and it is concluded that they are in conflict with each other: they meet the structural performance requirements while being detrimental to water management and preservation. Pavement design standards are reviewed to introduce the basic requirements for the use of pervious pavements. The paper concludes that under sustainable mobility, pervious pavements must be considered in urban road systems because it helps to resolve two problems: infrastructure needs and preservation of water resources. It also recommends additional research necessary to improve and expand on potential applications of pervious pavements.

KEYWORDS: pervious pavements, urban roads, mobility.

INTRODUCCIÓN

En la práctica vigente uno de los elementos necesarios para resolver el problema de la movilidad urbana es la construcción de vialidades. Los criterios tradicionales para el diseño y construcción de sus superficies de rodamiento usualmente se refieren a la accesibilidad, la resistencia y a la eficiencia económica, esto es, que los beneficios directos para el tránsito de vehículos sean mayores a los costos involucrados, sin tomar en cuenta

NOTAS DE AUTOR

eusebio_cardenas@yahoo.com

externalidades producidas como los daños al medioambiente. Pero en años recientes, y cada vez con mayor peso, se han incorporado criterios sociales y ambientales, los cuales incluyen los impactos que sobre la propia sociedad, el agua, el suelo, el aire, la flora y la fauna se generan durante la etapa de construcción y operación del proyecto. Un ejemplo de esas tendencias es la propuesta de carreteras verdes que se sustenta en el respeto al medioambiente.

En particular, en las áreas urbanas hay aspectos que no se han abordado suficientemente en el diseño y evaluación de vialidades, a pesar de que pueden ser de impacto significativo, tales como la ruptura de comunidades por barreras viales y el desaprovechamiento, conducción y desalojo del agua producto de las precipitaciones pluviales problema, este último ocasionado por la impermeabilidad de los pavimentos construidos.

La situación descrita se origina a partir de que las soluciones usuales en la construcción de la infraestructura vial de grandes concentraciones urbanas están afectadas por la divergencia: mejores condiciones de resistencia y menores posibilidades de permeabilidad y por lo tanto de aprovechamiento del recurso agua.

1. LA DIVERGENCIA CONCRETOS IMPERMEABLES-CONSERVACIÓN DEL AGUA

La imposibilidad actual para lograr resistencia y permeabilidad de los pavimentos bajo los criterios de diseño imperantes se explica en términos de los siguientes factores:

- a) Las vialidades para el tránsito vehicular usualmente se construyen con pavimentos diseñados para cumplir funciones tanto de alta resistencia al esfuerzo cortante como de baja deformabilidad. Sin embargo, la naturaleza de los materiales de construcción asocia una más de manera implícita a estas dos funciones: su baja permeabilidad, causante de reducir la infiltración de las aguas de lluvia que caen sobre la superficie de rodamiento. Para que estas aguas no dañen la obra deben ser canalizadas a veces a otras cuencas, lo que requiere de costosas obras de drenaje. Por ejemplo, la Ciudad de México invierte enormes sumas de dinero para drenar sus aguas negras y de lluvia que escurren por sus vialidades y después verterlas fuera del Valle de México a través del Emisor Central. En menor medida, esta condición se replica en otras zonas urbanas del país.
- b) Como esas aguas de lluvia así canalizadas ya no se filtran al subsuelo dejan de contribuir al equilibrio de sus aguas subterráneas disminuyendo el agua disponible para abastecer las poblaciones de la zona las cuales deben obtenerla de otras regiones mediante costosas obras de captación y conducción. Esto se ilustra otra vez con el caso de la Ciudad de México en donde, al prohibirse que se extrajera agua subterránea, se debió recurrir a la del Valle de Toluca, la cual contribuyó a su agotamiento. Por sobreexplotar sus acuíferos, ahora ambas ciudades deben tomar agua del sistema del río Cutzamala para cubrir parte de sus necesidades.

Esta sobreexplotación puede causar problemas adicionales; por ejemplo, procesos de consolidación regional que producen hundimientos generalizados, como en el Valle de México (Hiriart y Marsal, 1969), o agrietamientos de estratos superficiales, como en Toluca u otras ciudades del país (Alberro *et al.*, 2004, Figueroa Vega, 2004).

La evidencia cuantificada de lo anterior lo reportan Suriya y Mudgal (2012), quienes midieron que 90% de las precipitaciones pueden transformarse en escurrimiento superficial en zonas urbanas impermeables, mientras que en entornos naturales permeables este valor descende hasta 25%.

Con esta evidencia, y con la descripción previa de por qué ocurren esas diferencias, se justifica un planteamiento central de este trabajo: construir pavimentos tradicionales contribuye a agravar el problema de disponibilidad de agua, que es la interacción entre ambas áreas de conocimiento.

Pero además de los problemas descritos, también pueden identificarse los siguientes inconvenientes derivados del uso de pavimentos impermeables:

- a) Al aumentar el volumen de los escurrimientos de las aguas de lluvia por las razones expuestas se genera un exceso de demanda de las redes de drenaje a las que en varios lugares del mundo, entre ellos México, se canalizan las aguas pluviales. Adicionalmente, los patrones de las lluvias, tanto medias como extremas, muestran un incremento claro en décadas recientes debido al cambio climático (Christensen y Christensen, 2003). Al acumular esos antecedentes se tiene un incremento en la presencia de inundaciones que se han constituido en el más común y costoso de los problemas naturales (Huang *et al.*, 2008). Uno de los problemas generados consiste en que las aguas pluviales descontroladas pueden acarrear materiales tóxicos (Arhin *et al.*, 2014), los cuales por la naturaleza del evento no pueden ser tratados en las plantas instaladas y entonces se descargan directamente al medio natural produciendo un tipo de contaminación denominada difusa (Sañudo Fontaneda, 2014).
- b) Una afectación adicional al medioambiente se tiene en el incremento de las temperaturas en áreas localizadas dentro de las zonas urbanas causadas por la falta de humedad y a la retención de la radiación solar. A este fenómeno se le conoce como isla de calor (Haselbach *et al.*, 2011) y se sabe que en los años recientes se ha incrementado por el cambio climático (Santamouris, 2013)
- c) También se tiene un problema de incremento de costos por la necesidad de incorporar al proyecto de las vialidades diversas obras de drenaje superficial y subterráneo que permitan desalojar el agua que pueda llegarles y evitar así que causen daños a su estructura.
- d) El riesgo documentado de que este tipo de pavimentos puede convertir a la superficie de rodamiento en una que facilita el deslizamiento-resbalamiento de los vehículos (Arhin *et al.*, 2014).

En resumen, resolver el problema de infraestructura vial con base en pavimentos impermeables bajo ciertas condiciones geográficas contribuye a agravar el problema de manejo y disponibilidad de agua, además de ocasionar problemas adicionales, como los que se han descrito. Todo ello sugiere la búsqueda de soluciones alternas como la que plantean los pavimentos permeables.

Para abordar las posibles ventajas del uso de pavimentos permeables, en el apartado siguiente se revisan los factores que definen las características de los pavimentos para superficies de rodamiento, después se plantea el modelo general al que se incorpora el factor ambiental en términos de posibilidades de filtración del agua, se sigue con las características de los pavimentos permeables, se formulan recomendaciones para su uso y se concluye con una prospectiva sobre aspectos a indagar para un mejor aprovechamiento.

2. CRITERIOS VIGENTES DE DISEÑO

Los criterios de diseño de pavimentos se refieren, por un lado, en identificar las condiciones de las cargas que les serán aplicadas, sobre todo a la circulación de vehículos, y, por otro, en seleccionar los materiales con los que se dimensionan y construyen sus componentes para que su resistencia al esfuerzo cortante alcance su mayor valor posible.

Independientemente de las pruebas usadas para medir esa resistencia, el procedimiento que se emplea por lo general para controlar la calidad de su proceso constructivo se basa en la medición de los huecos del suelo con el que se construye cada una de las capas subyacentes a la capa que constituye la superficie de rodamiento de un pavimento, conocida como carpeta.

Esa medición de huecos del suelo se hace mediante la determinación de su peso volumétrico seco (PVS). Entonces, conforme a los criterios usuales de control de calidad, el objetivo que persigue es reducir a su mínimo posible esos huecos, lo que es equivalente a exigir que mediante procesos de compactación se lleve a su valor máximo al PVS o al menos, dependiendo de la capa del pavimento, a un porcentaje especificado de ese valor máximo.

Por tanto, al construir las capas de un pavimento, se busca que tengan el menor volumen de huecos posible, porque eso maximiza la resistencia al esfuerzo cortante y minimiza la deformabilidad de los materiales

empleados. Pero es claro que ese objetivo diverge del deseable para la sustentabilidad de lograr que el agua reunida en un pavimento se filtre al subsuelo puesto que, entre menos huecos tiene el suelo, más difícil es dicha filtración.

Lo descrito se ilustra en la figura 1 donde se esquematiza la relación entre las variables mencionadas y donde se encuentran dos variables independientes: las cargas producidas por los vehículos, las que determinan la resistencia deseada y la otra es la capacidad de carga o resistencia del suelo donde se pretenda construir la superficie de rodamiento. Las dos variables independientes determinan a su vez el diseño del pavimento en cuanto a tipo, materiales y dimensiones, todo lo cual determina el proceso constructivo y como resultantes la resistencia y el grado de permeabilidad del pavimento.

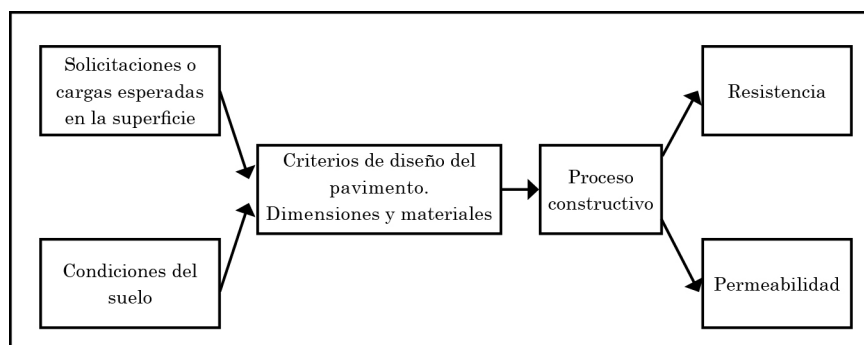


FIGURA 1.
El modelo general de diseño de pavimentos en vialidades.
Fuente: elaboración propia.

Como ya se señaló, si el criterio predominante en el diseño del pavimento es el de la máxima resistencia al menor costo, es muy probable que se presente una baja o nula permeabilidad.

Si el criterio de diseño es atender a las externalidades como el manejo y preservación del agua, además de contar con la resistencia deseada y el costo accesible, entonces se hará necesario determinar las características de las variables intervinientes que lo hagan posible. En este caso es donde aparecen los pavimentos permeables como elemento a considerar.

Ahora bien, cabe advertir que serán las condiciones específicas de ubicación de la obra las que determinarán el peso que cada uno de los tres factores mencionados tendría en el criterio general a aplicar para el diseño del pavimento del que se trate.

En un extremo, si la superficie es una que concentrará un alto volumen vehicular, con componente de vehículos pesados, con una resistencia aceptable del suelo y sin mayores problemas de manejo y disponibilidad de agua, la resistencia deseada del pavimento será el factor que prime en el diseño, aun cuando tenga una casi nula permeabilidad.

En otro extremo, con cargas vehiculares bajas, buena capacidad de carga del suelo y necesidades de agua, el pavimento puede ser de menor resistencia y así abrir la posibilidad al uso de pavimentos permeables.

Cabe precisar que en la evaluación socioeconómica del proyecto el factor costo podrá ser compensado en función de lo que se defina como beneficios del proyecto, ya que estos últimos por lo regular se refieren a los ahorros o pagos de los usuarios de los vehículos y lo que aquí se propone, como prospectiva del artículo, es que se incorpore en esos beneficios el valor del agua infiltrada al subsuelo. Un trabajo preliminar al respecto es el de Jaimes (2015).

El tema entonces es definir dentro de la gama de posibilidades de tipo y volúmenes de carga y condiciones del suelo aquellas en las cuales pueden utilizarse los pavimentos permeables.

3. LOS PAVIMENTOS PERMEABLES

Los pavimentos permeables forman parte del conjunto de medidas que pueden llevarse a cabo para atender criterios de sustentabilidad ambiental en materia de construcción de infraestructura para el transporte, en particular los relacionados con la conservación, el aprovechamiento y manejo de las aguas de lluvia.

En Watanabe (1995) se expone que los pavimentos permeables nacen como una forma alternativa de mitigación del escurrimiento superficial y los caudales pico (generadores de inundaciones) en las zonas urbanizadas, en las cuales la cuenca ha perdido su permeabilidad (figura 2). El objetivo de estos sistemas es generar zonas donde el agua se infiltre o se almacene y se amortigüe la cantidad de agua de lluvia precipitada aumentando sus tiempos de concentración. Se recomienda su uso en zonas de baja pendiente tales como estacionamientos, vías con tráfico ligero u ocasional y andenes, entre otros, en los que su nivel freático se encuentre muy por debajo del fondo de la zona de almacenamiento para que este no interfiera ni disminuya el volumen de acopio (Legret *et al.*, 1999; EPA, 1999).

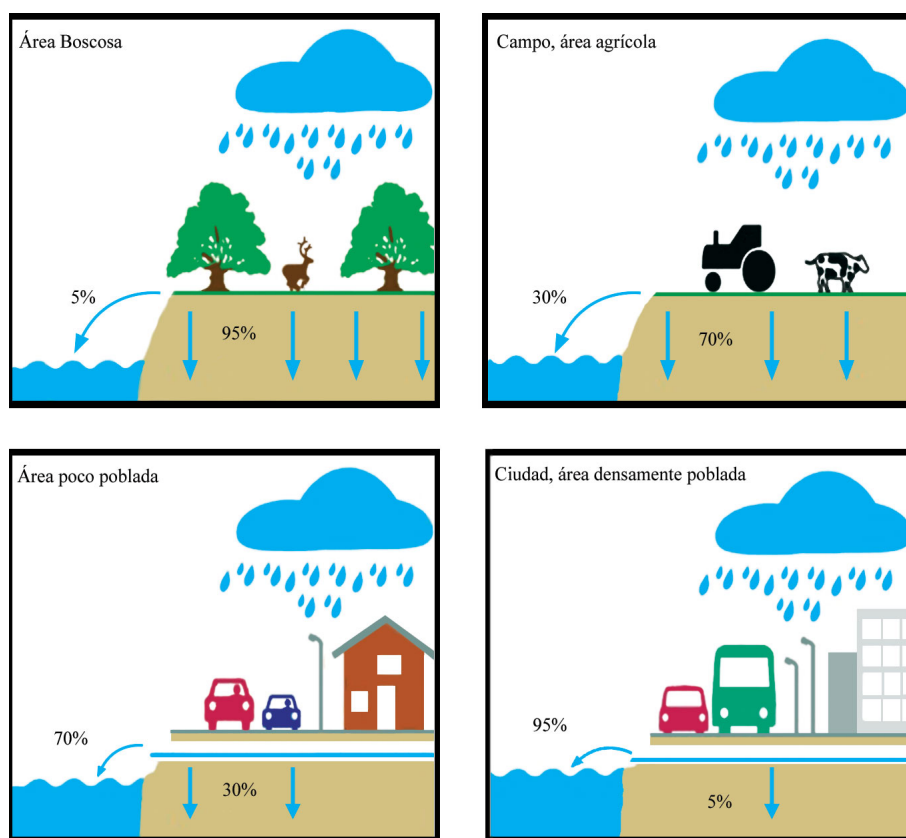


FIGURA 2.

Influencia de la urbanización en el drenaje natural.

Fuente: Castro, E. M. L. (2011), adaptado de Interpave (2008).

La estructura de los pavimentos permeables consiste por lo general en tres capas: *a*) una superficie de rodamiento que permite la entrada del agua, que puede ser de diferentes materiales como asfalto, concreto (pavimentos porosos), arcilla, grava, pasto, *b*) una capa de base de material granular fino, la cual permite una instalación adecuada de la superficie de rodamiento y *c*) una capa compuesta por una matriz de material granular de gran tamaño o por módulos o geo-células plásticas donde el agua se almacena (sub-base).

La sub-base se puede utilizar para infiltrar y retener el agua parcial o completamente como se muestra en las figuras 3, 4 y 5. En el caso de la infiltración, el suelo natural (subrasante) debe tener la capacidad para recibir estas aguas (recarga de acuíferos). El caso de retención se utiliza cuando el suelo natural tiende a ser

impermeable o cuando se quiere hacer uso de esta agua (aprovechamiento de agua de lluvia) (Watanabe, 1995; Interpave, 2008).

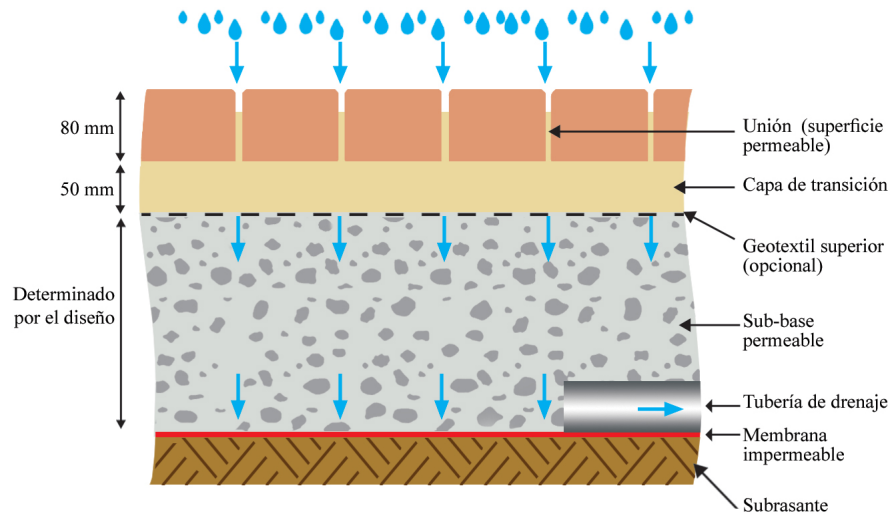


FIGURA 3.
Estructura de pavimento permeable con infiltración total.
Fuente: Castro, E. M. L. (2011), adaptado de Interpave (2008).

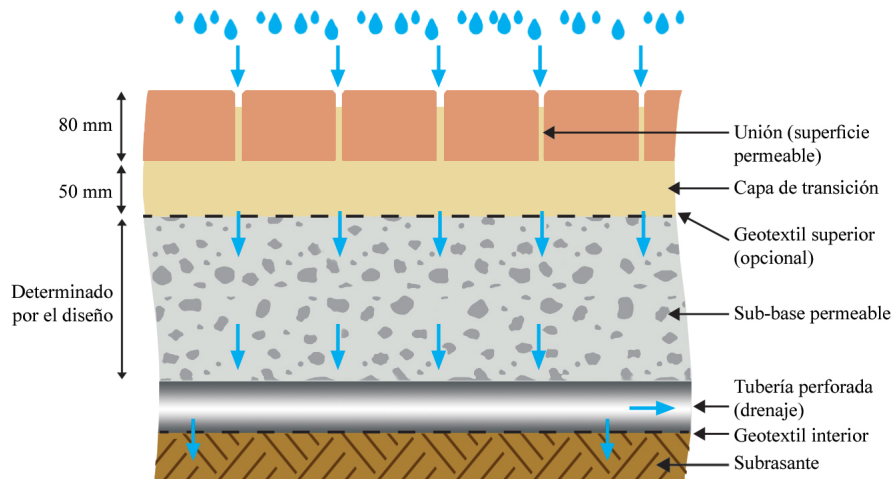


FIGURA 4.
Estructura de pavimento permeable con infiltración parcial.
Fuente: Castro, E. M. L. (2011), adaptado de Interpave (2008).

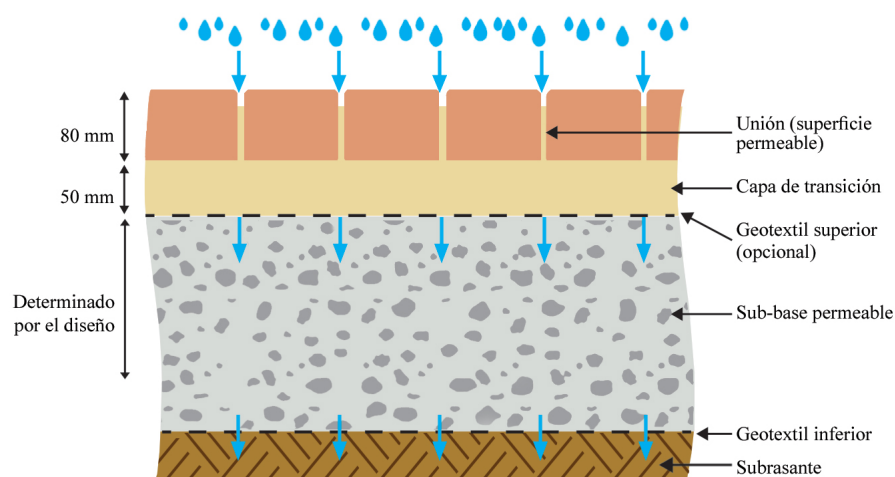


FIGURA 5.
Estructura de pavimento permeable sin infiltración alguna.

Fuente: Castro, E. M. L. (2011), adaptado de Interpave (2008).

Por su parte, Arhin *et al.* (2014: 42) definen un pavimento permeable como “una mezcla de cemento, agregado y agua, provista con un nivel de porosidad tal que permite al agua infiltrarse” a las capas inferiores. Resulta evidente que esa definición abarca sólo la correspondiente a la capa que constituye la superficie de rodamiento. Es claro que no resulta suficiente para que funcione de manera correcta, a menos que se le incorporen componentes adicionales en su parte inferior que permitan la conducción y el desalojo del agua filtrada a través de esa capa hacia el suelo de cimentación que deberá tener permeabilidad suficiente para filtrarlo a sus capas inferiores.

Se reporta que los pavimentos permeables tienen una antigüedad de 100 años, pero sólo hace unos 40 se han empezado a emplear de manera más frecuente (Hiriart, 2009). En la actualidad el concreto permeable es considerado por la EPA (Environmental Protection Agency) de los Estados Unidos como una de las Prácticas de Mejor Administración (BMP: Best Management Practices) para el control de los escurrimientos torrenciales, sobre una base local o regional (Tennis *et al.*, 2004).

Según Arhin *et al.* (2014) y Tennis *et al.* (2004), una de sus ventajas es que su superficie de rodamiento es relativamente fácil de modificar porque requiere sólo de minimizar o eliminar el agregado fino de su proporcionamiento de materiales.

Lecturas posteriores hicieron evidente, sin embargo, que al planteamiento anterior deben agregarse más variables. Ferrer (2015) sostiene que el buen funcionamiento de este producto puede darse sólo si se le agrega un aditivo a la mezcla. Por su parte, Hiriart (2009) reporta que marcas como BASF y SIKA tienen en el mercado sus propios aditivos para conseguir lo anterior.

Conviene resaltar que las capas inferiores de pavimento deben ser construidas de manera diferente a la convencional para posibilitar que el agua drenada hacia ellas por la naturaleza permeable de la superficie de rodamiento pueda ser distribuida sin problema hacia el terreno de cimentación. A su vez, debe verificarse que la permeabilidad de este tipo de terreno cumpla con las condiciones requeridas por el diseño y favorezca el tránsito del agua filtrada, a las capas inferiores del subsuelo (figura 6).

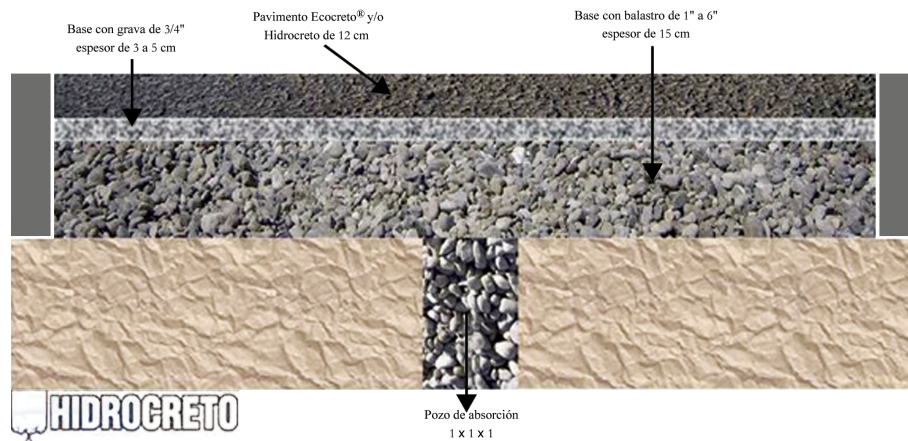


FIGURA 6.

Sección transversal de pavimento permeable con pozo de absorción.

Fuente: Jaimes (2015).

Por su parte, el programa de productos de la organización Tecnología Avanzada de Pavimentos de Concreto (ACPT, por sus siglas en inglés), incluye al concreto permeable como uno QUE se asocia con los fines que tiene de buscar productos que ayuden a reducir los congestionamientos, mejorar la seguridad y el desempeño, reducir costos, y alentar la innovación en materiales para pavimentos.

Esta organización señala de manera sintetizada las ventajas y desventajas de los concretos permeables (tabla 1).

TABLA 1.
Resumen de beneficios y limitaciones del concreto permeable en vialidades.

Ventajas	Desventajas
Manejo efectivo de los escurrimientos de aguas de lluvia con reducción de alcantarillas y bordillos	Uso limitado en áreas de tránsito pesado
Reducción de la contaminación en cuerpos de agua	Necesidad de prácticas especializadas de construcción
Recarga de mantos acuíferos	Mayor tiempo de curado
Mejor aprovechamiento de los terrenos adyacentes a las vialidades	Sensitividad al contenido de agua y al control en el concreto fresco
Reducción de islas de calor	Falta de métodos estandarizados de pruebas
Eliminación del estancamiento de agua	Especial atención y cuidado en el diseño al usar algunos tipos de suelo, como los expansivos y los susceptibles de congelación
Crédito de obras LEED	Posiblemente se requiera atención especial en casos de niveles elevados de aguas subterráneas

Fuente: Tennis *et al.* (2004).

A MANERA DE CONCLUSIÓN

Una tendencia reciente en materia de movilidad sustentable es la de superar el esquema de construir cada vez más infraestructura para el tránsito vehicular por un compuesto de redes viales, donde algunas de ellas sean para el uso peatonal y de ciclistas, otras para vehículos ligeros y un tercer tipo para tránsito de tipo masivo. Bajo ese esquema, se busca alcanzar beneficios sociales, ambientales y económicos, los cuales pueden verse incrementados por el uso de materiales permeables en la mayoría de las vialidades urbanas. Es así que el criterio de lograr altas resistencias en el diseño de pavimentos debe cambiar a uno en el que se favorezca la socialización y la sustentabilidad por medio de soluciones como las de los pavimentos permeables que han mostrado su capacidad de evitar los rasgos indeseables derivados de la impermeabilidad. Por ello, se considera muy recomendable su uso en redes viales basadas en el criterio de preservación del agua y movilidad de las personas. Esto además de investigar la viabilidad de ampliar su rango de aplicaciones mediante trabajos adicionales de investigación, cuyo enunciado preliminar se presenta en la prospectiva de este trabajo.

Es conveniente reportar que un trabajo exploratorio reciente de Jaimes (2015) mostró que el costo anual equivalente (CAE) del pavimento permeable en vialidades urbanas secundarias, comparado con los del concreto hidráulico y el concreto asfáltico, resulta competitivo y más aún cuando se le otorga un valor al volumen de agua infiltrada.

PROSPECTIVA

Con base en los reportes disponibles sobre su empleo, los autores consideran apropiado contribuir tanto a divulgar el uso de concretos permeables en su versión actual como a investigar el peso de variables que influyen en su comportamiento.

Los resultados que respaldan las referencias evidencian que este producto ha funcionado bien en México y en otras partes del mundo con la todavía limitante de que elevados niveles de tránsito requieren de altas resistencias al esfuerzo cortante, y ya se describió que los pavimentos permeables sólo funcionan cuando su estructura incluye huecos, por lo que tienen que sacrificar así una parte de su resistencia.

Lo anterior configura un reto interesante: lograr productos que al mismo tiempo sean resistentes y permeables. Para ello conviene recordar que el comportamiento mecánico de estos productos de concreto obedece, entre otros, a dos aspectos básicos: *a)* su relación agua/cemento, que se constituye en un factor esencial para el desarrollo de las interacciones físico-químicas entre el cemento hidráulico y los agregados y *b)* los huecos incorporados a su mezcla que, como en el caso de los suelos se reducen mediante procesos de compactación, que pueden definirse en dos casos extremos: el compactado con vibradores del concreto convencional y el compactado con grandes rodillos como los usados para suelos del concreto rodillado.

Por consiguiente, se requiere de estudios en las tecnologías del concreto y de la compactación que busquen mejorar la resistencia de los productos actuales sin disminuir su permeabilidad y así superar una divergencia de fondo. Los estudios podrían canalizarse por uno o más de los procedimientos siguientes: *a)* intentar el desarrollo de un modelo matemático analítico, como el planteado por la Ley de Abrams para representar el comportamiento de estas mezclas especiales de concreto, *b)* simular el comportamiento de estas mezclas mediante modelos basados en métodos numéricos, como el del elemento finito, lo que ahora ya puede hacerse gracias a las herramientas computacionales y *c)* usar la metodología estadística de los diseños experimentales y de las superficies de respuesta para explorar los caminos que puedan optimizar el empleo de este tipo de productos.

En el ámbito local es posible realizar trabajos para respaldar las posibilidades de usar este producto en la Zona Metropolitana de la Ciudad de Toluca (ZMCT), para lo cual es básico valorar la permeabilidad de su subsuelo porque las experiencias previas identifican su gran relevancia para el buen comportamiento integral del producto.

En un nivel experimental específico se pueden explorar los alcances reales de un producto que no incluya el aditivo o identificar materiales que puedan desarrollar respuestas similares y también revisar el efecto de modificar la mencionada energía de compactación, como se hace en muestras de suelo estabilizado (Fernández, 1982; Rico y Castillo, 1980) buscando ampliar su extensión a este tipo de productos de concreto (Arhin *et al.*, 2014). Mediante un diseño experimental apropiado se puede revisar el efecto, incluso el efecto combinado de estas variables.

Aquí se propone, en suma, propiciar una evolución en la búsqueda y aplicación de soluciones para construir infraestructura vial que permita lograr convergencia en los propósitos de alcanzar mejor movilidad y simultáneamente mayor sustentabilidad mediante la preservación del recurso agua.

El futuro de la sustentabilidad de las obras de infraestructura vial, en su componente de preservación del agua, depende en gran medida del tipo de materiales que se usen en su construcción por lo que la revisión de las propiedades y la posible utilización de, en este caso, el concreto permeable constituye un paso indispensable en su aplicación.

También conviene advertir que adicionalmente al análisis de sus propiedades, es necesario evaluar los proyectos que con dicho material se pretendan construir en función de los costos involucrados y los beneficios generados. Lo anterior implica hacer determinaciones sobre el valor del recurso agua que puede infiltrarse en el subsuelo y del costo de hacerlo y compararlo con el costo de obtener el agua de otras fuentes, así como del costo de desalojar las aguas de lluvia que no se infiltrarían.

El valor del agua es uno de los temas pendientes de resolver, ya que se ha considerado como tal el costo de extraerla, conducirla, tratarla y en su caso embotellarla, pero no se le ha otorgado un valor en sí misma y la problemática mundial de escasez hace que trabajos como los que aquí se proponen planteen la necesidad de ir en ese rumbo.

REFERENCIAS

- Alberro, J., Ayala, G. y Hernández, R. (2004). *Agrietamiento en la periferia de un valle sometido a bombeo*. UNAM.
- Arhin, S., Medhani, R. y Khan, W. (2014). Evaluation of mix designs and test procedures for pervious concrete. Washington: Howard University. Washington.
- Castro, E. M. L. (2011). Pavimentos permeables como alternativa de drenaje urbano.
- Christensen, J. H. y Christensen, O. B. (2003). Severe summertime flooding in Europe. *Nature*, 421(6925), 805-806.
- EPA (Environmental Protection Agency) (1999). *Studies preliminary data summary of urban stormwater best management practices*. EPA-821-R-99-012.
- Fernández, L. C. (1982). *Mejoramiento y estabilización de suelos*. México: Limusa.
- Ferrer, M. A. (2015). *Pavimentos permeables. Conferencia impartida en la Facultad de Ingeniería*. Toluca: UAEM.
- Figuroa Vega, G. E. (2004). *El agrietamiento de la ciudad de Toluca*. Gobierno del Estado de México.
- Haselbach, L., Boyer, M. Kevern, J. T. y Schaefer, V. R. (2011). Cyclic heat island impacts on traditional versus pervious concrete pavement systems. *Transportation Research Record*, 2240, 107-115.
- Hiriart, F. (2009). Pavimentos permeables. Presentación en Microsoft Power Point. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto. Disponible en <http://imcyc.com/50/ponencia/IngHiriart.ppt>
- Hiriart, F. y Marsal, R. J. (1969). El hundimiento de la Ciudad de México, en *El hundimiento de la Ciudad de México* (pp. 109-147). México: SHCP.
- Huang, X., Tan, H., Zhou, J., Yang, T. y Benjamin, A. (2008). Flood hazard in Hunan province of China: An economics loss analysis. *Natural Hazards*, 47(1), 65-73.
- Interpave (2008). *Guide to design, construction and maintenance of concrete block permeable pavements*. Leicester: Interpave The Precast Concrete Paving & Kerb.
- Jaimes, J. J. (2015). *Evaluación de pavimentos permeables en vialidades urbanas* (tesis de licenciatura). Toluca: UAEM.

- Legret, M., Nicollet, M., Miloda, P., Colandini, V. y Raimbault, G. (1999). Simulation of heavy metal pollution from stormwater infiltration through a porous pavement with reservoir structure. *Water Science Technology*, 119-125.
- Rico, A. y Castillo, H. (1980). *La ingeniería de suelos en las vías terrestres*. México: Limusa.
- Santamouris, M. (2013). Using cool pavements as a mitigation strategy to fight urban heat island-A review of actual developments. *Renewable and Sustainable Energy Review*, 26, 224-240.
- Sañudo Fontaneda, L. A. (2014). *Análisis de la infiltración de agua de lluvia en firmes permeables con superficies de adoquines y aglomerados porosos para el control en origen de inundaciones* (tesis de doctorado). Santander: Universidad de Cantabria.
- Suriya, S. y Mudgal, B. V. (2012). Impact of urbanization on flooding: The thirusoolam sub watershed-A case study. *Journal of Hidrology*, 412-413, 210-219.
- Tennis, P. D., Leming, M. L. y Akers, D. J. (2004). *Pervious concrete pavements*. Portland Cement Association. Disponible en http://myscmap.sc.gov/marine/NERR/pdf/PerviousConcrete_pavements.pdf
- Watanabe, S. (1995). Study on storm water control by permeable pavement and infiltration pipes. *Water Science Technology*, 25-32.