

Una metodología para el diseño hidrológico de pavimentos de hormigón poroso

A methodology for hydrologic design of porous-concrete pavements Products

Juan F. Weber¹  

¹Grupo de Investigación y Desarrollo en Recursos Hídricos y Saneamiento. Facultad Regional de Córdoba, Universidad Tecnológica Nacional – Córdoba, Argentina.

Introducción

Los pavimentos de hormigón poroso se presentan como una solución efectiva para reducir el escurrimiento superficial en entornos urbanos, lo que contribuye al desarrollo sustentable de las ciudades. Estos pavimentos permiten la infiltración del agua, lo cual es fundamental para mitigar los efectos de la urbanización, como las inundaciones. Sin embargo, la capacidad de infiltración del pavimento no depende únicamente de la capa de rodamiento de hormigón, sino también de las características de la base granular y la subrasante del suelo natural, lo que requiere un análisis integral del sistema de capas.

Objetivos

El objetivo principal de este estudio es presentar una metodología simplificada basada en el modelo de Horton para definir el espesor hidrológicamente necesario de la base granular y simular el movimiento del agua en el sistema de pavimento poroso. Esta metodología busca facilitar el diseño y análisis de pavimentos permeables en contextos urbanos.

Metodología

La metodología se basa en el modelo de Horton, que se utiliza para simular la infiltración del agua en suelos. Se define el espesor necesario de la base granular mediante un enfoque simplificado que considera tanto las características del pavimento como las de las capas subyacentes. Posteriormente, se realiza una simulación del movimiento del agua en el sistema para evaluar la eficiencia del diseño propuesto. Para ilustrar su aplicación, se presenta un ejemplo práctico de diseño hidrológico típico.

Resultados

La aplicación de la metodología propuesta en un caso de diseño típico permite determinar el espesor adecuado de la base granular necesario para asegurar la infiltración eficiente del agua. Los resultados muestran que el modelo puede ser utilizado como una herramienta efectiva para calcular y simular el comportamiento del agua en sistemas de pavimentos de hormigón poroso.

Conclusiones

El método simplificado presentado es útil para los ingenieros que trabajan en el diseño hidrológico de pavimentos permeables, ya que proporciona una manera rápida y eficaz de calcular el espesor de la base granular y simular el movimiento del agua. Además, esta metodología puede ser de gran valor en la formación académica en áreas de drenaje urbano, tanto a nivel de grado como de posgrado.

¿Cómo citar?

Weber, J.F. Una metodología para el diseño hidrológico de pavimentos de hormigón poroso. Ingeniería y Competitividad, 2024, 26(3)e-21214049

<https://doi.org/10.25100/iyc.v26i3.14049>

Recibido: 9-05-24

Evaluado: 06-06-24

Aceptado: 01-11-24

Online: 6-11-24

Correspondencia 
jweber@frc.utn.edu.ar



Abstract

Introduction

Porous concrete pavements represent an effective solution for reducing surface runoff in urban environments, contributing to the sustainable development of cities. These pavements allow water infiltration, which is crucial to mitigate the effects of urbanization, such as flooding. However, the infiltration capacity of the pavement depends not only on the porous concrete wearing course but also on the characteristics of the granular base and the natural soil subgrade, requiring an integrated analysis of the layered system.

Objectives

The main objective of this study is to present a simplified methodology based on the Horton model to define the hydrologically necessary thickness of the granular base and simulate the movement of water in the porous pavement system. This methodology aims to facilitate the design and analysis of permeable pavements in urban settings.

Methodology

The methodology is based on the Horton model, which is used to simulate water infiltration into soils. The necessary thickness of the granular base is defined through a simplified approach that takes into account both the characteristics of the pavement and the underlying layers. Subsequently, a simulation of water movement within the system is performed to evaluate the effectiveness of the proposed design. To illustrate its application, a typical hydrological design case is presented.

Results

The application of the proposed methodology to a typical design case allows for the determination of the appropriate thickness of the granular base required to ensure efficient water infiltration. The results show that the model can be used as an effective tool to calculate and simulate water behavior in porous concrete pavement systems.

Conclusions

The simplified method presented is useful for engineers involved in the hydrological design of permeable pavements, as it provides a quick and effective way to calculate the thickness of the granular base and simulate water movement. Additionally, this methodology can be of great value in academic training in urban drainage, both at the undergraduate and graduate levels.

Keywords: urban Hydrology, Sustainable Urban Drainage Systems, Infiltration, Porous Pavements.

Why was it done?

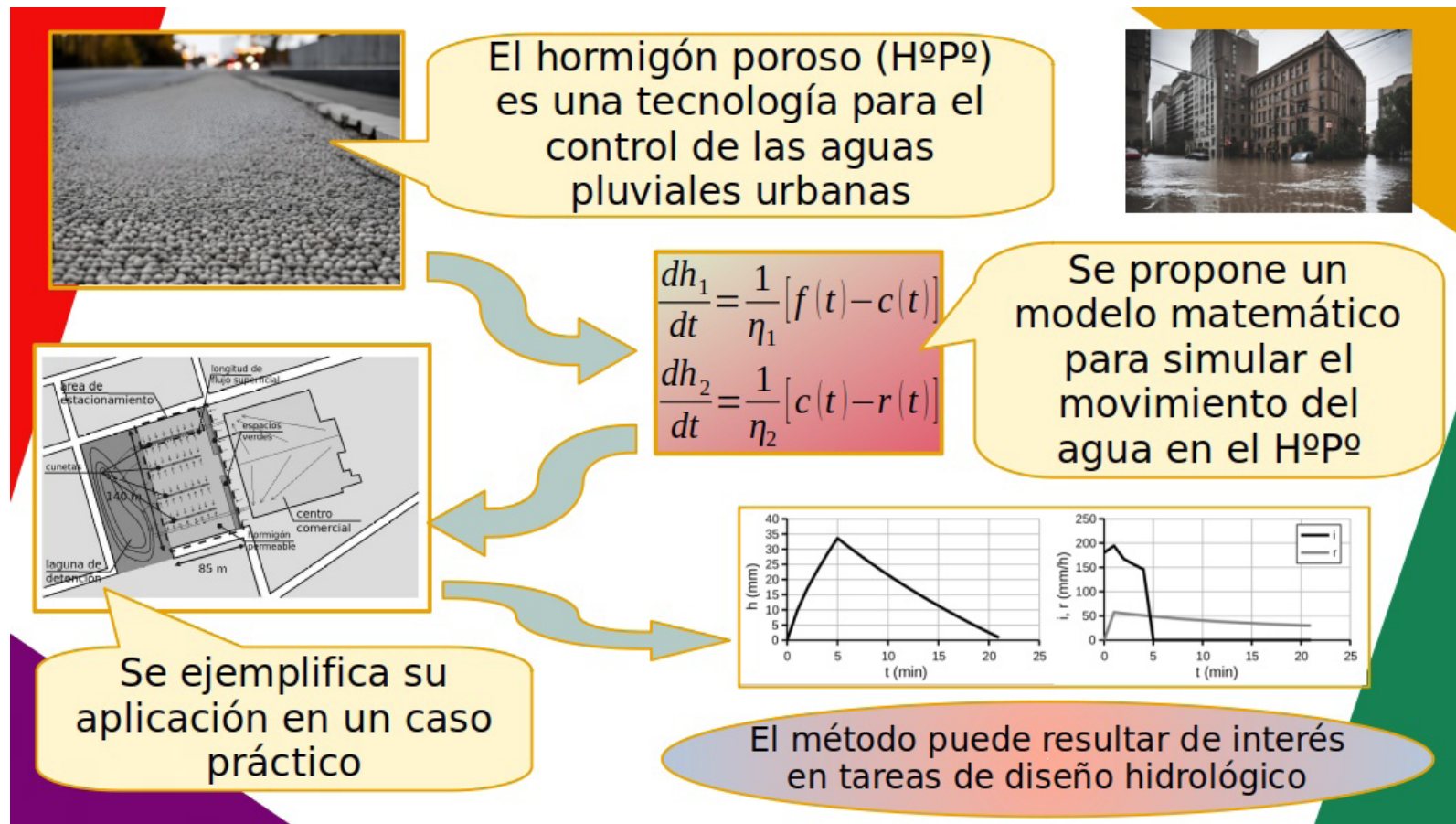
In the context of the growing use of porous concrete pavements as a technology within Sustainable Urban Drainage Systems (SUDS), a need has been identified for effective hydrological simulation methods. Such methods would enable preliminary design and allow for the simulation of the hydrological performance of these permeable surfaces.

What were the most relevant results?

The main outcome is a simplified methodology that enables the preliminary hydrological design of the profile formed by the porous pavement and its granular subbase, as well as the simulation of water movement within this pavement.

What do these results provide?

They provide a tool that is expected to be useful in the practical hydrological design of Sustainable Urban Drainage Systems, as well as in the teaching of Urban Hydrology.



Introducción

El desarrollo urbano y la construcción de pavimentos convencionales transforma el suelo natural permeable en una cubierta terrestre impermeable. La construcción de sistemas de pavimento impermeables convencionales ha provocado dos cambios importantes en el entorno local, que incluyen: (a) cambios en los aspectos hidrológicos y (b) variaciones en el ambiente térmico circundante. La naturaleza impermeable de los sistemas de pavimento convencionales es el resultado de un aumento de la cantidad de escorrentía de aguas pluviales que ha resultado en un gran volumen de escurrimiento que contiene niveles inaceptables de contaminantes e inundaciones repentinas injustificadas. Además, la gestión de este flujo requiere grandes lagunas de retención antes de su vertido a los cuerpos de agua naturales (1). Por otro lado, los pavimentos porosos tienen la capacidad de reducir el volumen de escorrentía y mejorar la calidad del escurrimiento. De hecho, pueden almacenar el escurrimiento de aguas pluviales hasta que se infiltran en el suelo o son transportados aguas abajo en el sistema de gestión de aguas pluviales mediante un sistema de drenaje. Por esta razón, muchas comunidades están explorando su uso como un diseño de desarrollo alternativo de bajo impacto para medidas de control de aguas pluviales. Estos sistemas de pavimento permeable pueden contribuir a resolver los problemas de drenaje y reducir el riesgo de inundaciones repentinas resultantes del continuo desarrollo urbano (2).

Los pavimentos de hormigón poroso

Un sistema de hormigón poroso está compuesto no solo por el propio pavimento (capa superior) de este material, sino también por una base granular y la propia subrasante de suelo natural (incluyendo entre estas, habitualmente, una protección con geotextil). Tanto para el análisis y diseño hidrológico como hidráulico, debe considerarse el conjunto, porque su capacidad de almacenamiento y de infiltración viene condicionada por las características de todos sus componentes.

Toda la superficie del hormigón poroso es permeable, a diferencia de las superficies compuestas como las de los bloques de juntas abiertas y las placas grilladas de hormigón (3). De este modo, usualmente, la capacidad de infiltración del pavimento de hormigón poroso es varios órdenes de magnitud superior a la subrasante (la que a su vez es habitualmente menos permeable que el suelo natural debido al proceso de compactado). Debido a esto (y a consideraciones estructurales) es habitual que se disponga, entre el pavimento de hormigón poroso y la subrasante, una subbase de material granular grueso; esta subbase cumple la función hidrológica de constituir un reservorio temporal del agua infiltrada, mientras ésta se infiltra al suelo subyacente. Completa el perfil típico un manto de geotextil, entre la subbase granular y la subrasante, que cumple la función de filtro (Fig. 1).

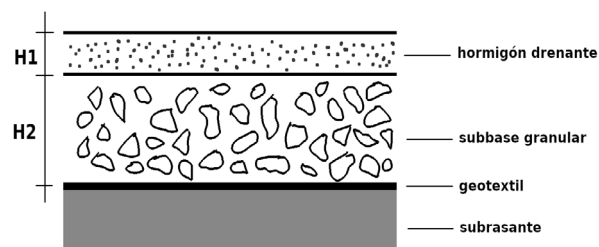


Figura 1. Perfil típico de un pavimento de hormigón poroso (elaboración propia)

En el caso de subrasantes con muy baja o nula capacidad de infiltración es recomendable drenar lateralmente la subbase granular, de modo de evacuar el exceso de agua almacenada: en este caso, la función primordial del conjunto base – drenes es actuar como un reservorio de atenuación, amortiguando de esta forma los caudales de escurrimiento. Estos drenes, dependiendo del diseño del gálibo, pueden ser construidos con material granular o con conductos perforados (Fig. 2).



Figura 2. Perfiles esquemáticos de pavimentos porosos no drenados (izquierda) y drenados (derecha). Componentes: pavimento de hormigón poroso (HP); subbase granular (BG); subrasante (SR); conducto perforado (CP). Procesos hidrológicos dominantes: infiltración (F), percolación (C), recarga (R), escurrimiento superficial (Q), evaporación (E), drenaje lateral (D) (elaboración propia)

El espesor H_1 de la capa de hormigón poroso viene principalmente condicionada por consideraciones estructurales, en un rango típico entre 10 a 20 cm (4); con porosidades típicas del orden del 15 %. El espesor H_2 de la subbase granular suele estar definida por consideraciones hidrológicas, como se describirá más adelante; restando luego la verificación estructural del paquete com-

pleto. Su porosidad es habitualmente más grande que la del pavimento de hormigón poroso (del orden del 30 %) de modo que su capacidad de infiltración es aún mayor (4).

En los pavimentos permeables no drenados (Fig. 2, izquierda), toda el agua infiltrada al hormigón poroso (F) y percolada a la subbase granular (C) debe ser infiltrada a la subrasante (R), de modo que el exceso de percolación, en relación a la capacidad de infiltración de esta última, debe ser temporalmente almacenado en la subbase granular: esto condiciona hidrológicamente el espesor de esta capa. De esta forma, el espesor de la subbase granular queda condicionada, entre otras variables, por la capacidad de infiltración de la subrasante; es necesaria una adecuada caracterización de esta capacidad, a través de mediciones in situ.

Antecedentes

Tennis et al. (5) presentan unas consideraciones de diseño hidrológico para pavimentos permeables, entre las que incluyen: permeabilidad, capacidad de almacenamiento y características del suelo subyacente: la metodología (aplicada en un ejemplo), de carácter empírico, puede servir como punto de partida para un diseño preliminar. Ferguson (3) describe conceptualmente el funcionamiento del pavimento poroso, incluyendo la subbase granular y la subrasante de suelo natural. Además presenta una compilación de parámetros experimentales o de campo para pavimentos porosos, incluyendo: tasas de infiltración, coeficientes de escorrentía y velocidad de escorrentía superficial.

Wanielista et al. (6) presentan un modelo de balance de masas aplicable a un pavimento de hormigón poroso. El modelo discrimina entre una simulación de eventos y una de carácter continuo. Aplicaron este modelo para representar el comportamiento de diversos pavimentos porosos ubicados en Florida, Georgia y Carolina del Sur (EE.UU.). Rodden et al. (7) presentan una metodología simplificada de diseño hidrológico para pavimentos de hormigón poroso, basada en un balance volumétrico, que permite obtener el área de pavimento poroso requerida y el espesor de la capa de almacenamiento, así como el tiempo de detención del escurrimiento. Esta metodología está implementada en el software PerviousPave de la Asociación Americana de Pavimentos de Hormigón (8). El espesor requerido para la subbase granular viene dado por:

$$h_s = \frac{E \cdot t_d - h_{curb} - r_c \cdot h_c}{r_s} \quad (1)$$

donde E es la tasa de infiltración del suelo, t_d es el tiempo máximo de detención del agua en la sección permeable (típicamente 24 hs o menos), h_{curb} es la altura del cordón o la altura disponible para la inundación superficial, r_c es la relación de vacíos del hormigón poroso, h_c es el espesor del hormigón poroso, y r_s es la relación de vacíos de la subbase granular. Cabe aclarar que esta metodología asume que la intensidad de la precipitación es constante en el tiempo.

Eisenberg et al. (4) presentan una compilación de los métodos de diseño hidráulicos e hidrológicos para pavimentos permeables. Entre otros, presentan estimaciones del número de curva CN para el método de pérdidas del SCS, coeficientes de escorrentía del Método Racional, y el planteo del tránsito en el reservorio de la base granular, pero en términos genéricos, sin especificar una metodología de implementación.

El difundido software SWMM (9) incluye, en su versión 5.1, un módulo para el modelado de los denominados Desarrollos de Bajo Impacto (LID). Los LID están representados por una combinación de capas verticales cuyas propiedades se definen por unidad de área. Esto permite colocar fácilmente LID con el mismo diseño pero con diferente cobertura de área dentro de diferentes subcuencas de un área de estudio. Durante una simulación, SWMM realiza un balance de humedad que realiza un

seguimiento de cuánta agua se mueve y se almacena dentro de cada capa LID. El modelo SWMM5-LID se ha empleado y calibrado exitosamente en algunas áreas permeables (10). Sin embargo, esta representación implica la inclusión del LID dentro un proyecto SWMM de mayor extensión, lo que puede resultar un limitante en tareas de análisis preliminar o predimensionado hidrológico. Además, existen ciertas configuraciones del sistema de drenado que no pueden ser adecuadamente representadas por SWMM-LID (11).

Metodología

El balance hidrológico

En cualquier sistema hidrológico la aplicación del teorema de transporte de Reynolds a la masa de agua (como propiedad extensiva) da lugar a la Ec. (2), conocida como ecuación de continuidad hidrológica (12):

$$\frac{dS}{dt} = I(t) - Q(t) \quad (2)$$

donde S es el almacenamiento del sistema (volumen de agua almacenado) (m^3), I es el caudal de entrada (m^3/s) y Q el caudal de salida (m^3/s). En la Fig. 3 (izquierda) se presenta la relación visual entre estas variables.

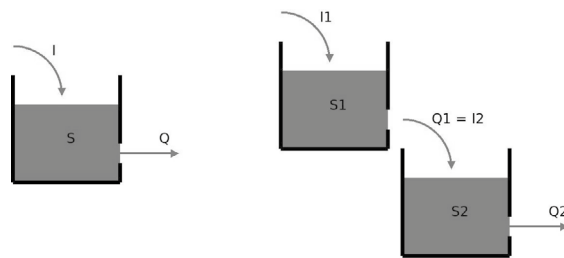


Figura 3. A la izquierda: variables presentes en la ecuación de continuidad hidrológica. A la derecha: Un sistema hidrológico conformado por dos partes (elaboración propia)

La Ec. (1) es una ecuación diferencial ordinaria, que habitualmente se resuelve numéricamente, dado el carácter discreto y/o empírico de las entradas y salidas. Para ello, se requiere fijar un condición inicial: debe conocerse el estado inicial del sistema, esto es, el almacenamiento S para $t = 0$, $S(0)$.

Cuando el sistema hidrológico está conformado (o conceptualizado) por partes discretas interrelacionadas, es posible plantear un sistema de ecuaciones que describa al conjunto, con tantas ecuaciones y condiciones iniciales como partes constitutivas. Tómese por ejemplo, el sistema indicado en la Fig. 3 (derecha).

Teniendo en cuenta que la salida de la parte 1 es la entrada de la parte 2, es posible plantear el siguiente sistema de ecuaciones diferenciales, cuya solución describe la variación simultánea del almacenamiento en los dos reservorios:

$$\begin{aligned} \frac{dS_1}{dt} &= I_1(t) - Q_1(t) \\ \frac{dS_2}{dt} &= Q_1(t) - Q_2(t) \end{aligned} \quad (3)$$

Para completar la definición del problema, es necesario conocer los estados iniciales $S_1(0)$ y $S_2(0)$. Asimismo, como es habitual en Hidrología, los volúmenes se expresan por unidad de superficie, es decir como láminas (usualmente en mm) de modo que los flujos se expresan como tasas (usualmente en mm/h). Dividiendo ambos miembros de las dos expresiones anteriores por el área se obtiene:

$$\begin{aligned} \frac{dh_1}{dt} &= i_1(t) - q_1(t) \\ \frac{dh_2}{dt} &= q_1(t) - q_2(t) \end{aligned} \quad (4)$$

donde $h = S/A$ es el lámina almacenada (mm), $i = I/A$ es la intensidad de la precipitación (mm/h) y $q = Q/A$ es la escorrentía por unidad de área (mm/h).

En cualquier caso, la calidad de la solución obtenida dependerá de la adecuada caracterización de los flujos entrantes y salientes en el sistema.

Un modelo Hortoniano para el pavimento de hormigón poroso

Considerando como sistema el indicado en la Fig. 2 (izquierda), es posible conceptualizar al sistema hidrológico bajo análisis al conformado por las dos capas superiores: el pavimento de hormigón poroso 1 y la base granular 2. Bajo este supuesto, es válido el sistema dado por la Ec. (4), teniendo en cuenta que el flujo entrante a la capa 1 es la infiltración (fracción de la precipitación que ingresa al hormigón poroso), el flujo saliente de la capa 1 (y entrante a la capa 2) es la percolación (despreciando la evaporación), y el flujo saliente de la capa 2 es la recarga:

$$\begin{aligned} \frac{dS_1}{dt} &= F(t) - C(t) \\ \frac{dS_2}{dt} &= C(t) - R(t) \end{aligned} \quad (5)$$

Como anteriormente, estas ecuaciones pueden expresarse como tasas en mm/h al dividir por el área A bajo análisis. Sin embargo, es necesario relacionar las alturas h con las porosidades η de cada capa, dado que parte del volumen es ocupado por la fracción sólida. Por tanto, la altura real de agua en el medio poroso viene dada por:

$$h = \frac{S}{\eta A} \quad (6)$$

Bajo estas condiciones, el sistema dado por la Ec. (4) puede escribirse como:

$$\begin{aligned} \frac{dh_1}{dt} &= \frac{1}{\eta_1} [f(t) - c(t)] \\ \frac{dh_2}{dt} &= \frac{1}{\eta_2} [c(t) - r(t)] \end{aligned} \quad (7)$$

Las ecuaciones anteriores deben complementarse con expresiones que caractericen a $f(t)$, $c(t)$ y $r(t)$, con las condiciones iniciales (habitualmente $h_1(0) = h_2(0) = 0$ -estado vacío-) y, dado que los almacenamientos de las capas 1 y 2 son finitos, los espesores H_1 y H_2 de esas capas y sus respectivas porosidades η_1 y η_2 . Específicamente, debe garantizarse para todo tiempo t en la solución, que:

$$\begin{aligned} h_1(t) &\leq H_1 \cdot \eta_1 \\ h_2(t) &\leq H_2 \cdot \eta_2 \end{aligned} \quad (8)$$

La función $r(t)$ viene dada, potencialmente, por la capacidad de infiltración del suelo de la subrasante. Para su caracterización, es posible plantear diversos métodos hidrológicos. En condiciones reales puede estar limitada por la tasa de percolación $c(t)$: si ésta es menor que la tasa de recarga (o de infiltración en la subrasante) potencial, entonces la tasa de recarga real será igual a la de percolación. Esto supone que la porosidad de la base granular es suficientemente grande como para que, por un lado, no se produzca una redistribución significativa del flujo en ese manto, y por otro,

el tiempo de traslado del flujo en esta base granular sea suficientemente pequeño en relación al paso temporal de integración Δt a utilizarse en la integración del sistema dado por la Ec. (7).

Si para caracterizar la capacidad de infiltración de la subrasante se utiliza el método de Horton (13), entonces la función $r(t)$ puede expresarse como:

$$r(t) = \begin{cases} r_b + (r_0 - r_b)e^{-kt} & \text{si } h_2(t) > 0 \\ 0 & \text{si } h_2(t) = 0 \end{cases} \quad (9)$$

donde $r(t)$ es la tasa potencial de infiltración en el suelo de la subrasante (mm/h), r_b es la tasa base de infiltración en el suelo de la subrasante (mm/h), r_0 es la tasa inicial de infiltración en el suelo de la subrasante (mm/h) y k es un factor de forma de la ecuación de Horton para el suelo de la subrasante (h^{-1}).

En el caso de la función $c(t)$ (la percolación desde la capa de hormigón poroso hacia la base granular), nuevamente es posible asumir que la gran porosidad de esta capa hace que toda el agua libre disponible en la capa de hormigón poroso (procedente de la infiltración en la superficie $f(t)$) pueda percolar libremente, quedando limitada únicamente por la disponibilidad de espacio libre en el manto inferior, en caso contrario, quedará (simplificadamente) limitada por la conductividad hidráulica de la base granular. Expresado en forma matemática:

$$c(t) = \begin{cases} K_2 & \text{si } h_2(t) < H_2 \cdot \eta_2 \text{ y } f(t) > K_2 \\ f(t) & \text{si } h_2(t) < H_2 \cdot \eta_2 \text{ y } f(t) \leq K_2 \\ 0 & \text{si } h_2(t) = H_2 \cdot \eta_2 \end{cases} \quad (10)$$

donde K_2 es la conductividad hidráulica de la base granular (mm/h) y H_2 es la altura de la base granular (m).

La tasa de infiltración $f(t)$ en la capa superior de hormigón poroso puede expresarse en forma general (asumiendo válida la ecuación de Horton), como

$$f(t) = \begin{cases} f_p(t) = f_b + (f_0 - f_b)e^{-kt} & \text{si } h_1(t) < H_1 \cdot \eta_1 \text{ y } i(t) > f_p(t) \\ i(t) & \text{si } h_1(t) < H_1 \cdot \eta_1 \text{ y } i(t) \leq f_p(t) \\ 0 & \text{si } h_1(t) = H_1 \cdot \eta_1 \end{cases} \quad (11)$$

donde $f_p(t)$ es la tasa potencial de infiltración en el hormigón poroso (mm/h), f_b es la tasa base de infiltración en el hormigón poroso (mm/h), f_0 es la tasa inicial de infiltración en el hormigón poroso (mm/h) y k es el factor de forma de la ecuación de Horton para el hormigón poroso (h^{-1}).

En el caso particular, pero muy frecuente, en que la porosidad de la capa de hormigón poroso sea lo suficientemente alta, la tasa de infiltración potencial es independiente del tiempo e igual a una tasa base de infiltración f_b , que puede asumirse igual a la permeabilidad (conductividad hidráulica saturada vertical) del medio. En este caso, la Ec. (11) puede simplificarse en:

$$f(t) = \begin{cases} K_1 & \text{si } h_1(t) < H_1 \cdot \eta_1 \text{ y } i(t) > K_1 \\ i(t) & \text{si } h_1(t) < H_1 \cdot \eta_1 \text{ y } i(t) \leq K_1 \\ 0 & \text{si } h_1(t) = H_1 \cdot \eta_1 \end{cases} \quad (12)$$

donde K_1 es la conductividad hidráulica del hormigón poroso (mm/h)

En caso de no contar con una caracterización experimental de la permeabilidad del hormigón poroso a utilizar, es posible estimarla con base a su porosidad (14) a través de la Ec. (13):

$$K = 18 \left[\frac{\eta_1^3}{(1-\eta_1)^2} \right] \quad (13)$$

donde K es la permeabilidad (cm/s) y η_1 es la porosidad del hormigón poroso (adimensional).

Finalmente, si ocurre que $f(t) = 0$ y $i(t) > 0$ (llueve al haberse alcanzado la saturación de la capa de hormigón poroso), la tasa de escurrimiento superficial $q(t)$ y el caudal de escurrimiento superficial $Q(t)$ vendrán dadas por:

$$\begin{aligned} q(t) &= i(t) - f(t) \\ Q(t) &= q(t) \cdot A \end{aligned} \quad (14)$$

El sistema dado por la Ec. (7) se resuelve habitualmente en forma numérica; las siguientes expresiones implementan su solución a través del método de Euler:

$$\begin{aligned} h_{1i+1} &= h_{1i} + \frac{1}{\eta_1} [f_i - c_i] \Delta t \\ h_{2i+1} &= h_{2i} + \frac{1}{\eta_2} [c_i - r_i] \Delta t \end{aligned} \quad (15)$$

donde $\Delta t = t_{i+1} - t_i$ es el intervalo de tiempo de cálculo.

Predimensionado de la subbase granular

El espesor H_1 del pavimento de hormigón poroso (Fig. 1) viene definido, en general, por consideraciones de resistencia mecánica. El espesor H_2 la subbase granular queda terminado tanto por consideraciones mecánicas como hidrológicas. En general, se predimensiona con base a su funcionalidad hidrológica y se verifica si este espesor es compatible con los requerimientos mecánicos, asumiendo el mayor.

En el caso en que toda la precipitación caída se infiltre y percole a la subbase granular, y que no ocurran flujos horizontales, es posible estimar en forma simplificada el espesor de esta capa, asumiendo que debe ser capaz de almacenar (temporalmente) toda la lámina precipitada e infiltrada, como:

$$H_2 = \frac{P}{\eta_2} \quad (16)$$

donde P es la precipitación (mm) y η_2 es la porosidad de la subbase granular (adimensional). En esta ecuación, se asume que la contribución de la subrasante del suelo natural a través de la infiltración es despreciable: esto es adecuado si la precipitación P ocurre en un tiempo breve, es decir, si la intensidad i es suficientemente alta. Sin embargo, para un mismo periodo de retorno, en general la lámina precipitada crece indefinidamente con la duración, como puede deducirse a partir de una relación estándar intensidad-duración-recurrencia (o curva idT) (12) de la forma:

$$i = \frac{aT^b}{(D+c)^d} \quad (17)$$

donde i es la intensidad de la precipitación (mm/h), T es el periodo de retorno (años), D es la duración de la precipitación (minutos) y a , b , c , d son los parámetros de la función idT. La lámina precipitada P viene dada por:

$$P(D) = \frac{aDT^b}{(D+c)^d} \quad (18)$$

Como consecuencia, no es posible asegurar a priori qué duración producirá la mayor lámina en exceso P_e , si se considera la capacidad de infiltración de la subrasante. Una forma de resolver el problema es determinar la duración D_m que produce la mayor lámina en exceso acumulada P_e , entendiendo a ésta como la diferencia entre la lámina precipitada y la infiltrada. Esta situación se

esquematiza en la Fig. 4. Allí pueden verse precipitaciones de la misma recurrencia, de intensidad constante y distintas duraciones superpuestas a la tasa de infiltración acumulada $f(t)$. Las áreas rayadas, ubicadas por encima de esta curva, corresponden a las láminas en exceso acumuladas P_e al finalizar la respectiva precipitación. Si bien, por ejemplo, la intensidad i_1 es la mayor (por ser la precipitación de menor duración), la lámina en exceso P_{e1} no necesariamente representa la mayor acumulación de agua en la base granular. En el otro extremo, si la duración es suficientemente larga, como en D_5 , es posible que la intensidad i_5 se mantenga siempre por debajo de la capacidad de infiltración de la subrasante y, por tanto, no se acumule agua en la base granular.

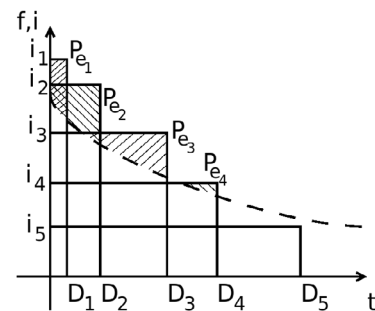


Figura 4. Precipitaciones de la misma recurrencia, de intensidad constante y distintas duraciones, junto con la tasa de infiltración potencial. Las zonas rayadas corresponden a las láminas en exceso (elaboración propia)

Asumiendo válido el modelo de infiltración de Horton, la lámina infiltrada $F(D)$ al finalizar la precipitación viene dada por:

$$F(D) = \frac{f_0 - f_b}{k} (1 - e^{-kD}) + f_b D \quad (19)$$

por lo tanto, si la intensidad $i(t)$ se mantiene constante, la lámina en exceso acumulada P_e viene dada por:

$$P_e(D) = \begin{cases} P(D) - F(D) & \text{si } P(D) > F(D) \\ 0 & \text{si } P(D) \leq F(D) \end{cases} \quad (20)$$

Si la capacidad de infiltración de la capa de hormigón poroso fuera menor a la intensidad de precipitación, entonces el valor de $P(D)$ de la Ec. (20) deberá limitarse a esa capacidad de infiltración.

La función dada por la Ec. (20) tiene un valor máximo, el cual puede utilizarse en reemplazo de P en la Ec. (16) para estimar la altura máxima del agua en la subbase granular. En la Fig. 5 se presenta la descripción gráfica de este modelo conceptual. Para duraciones menores a una duración característica D^* , la lámina acumulada precipitada supera a la lámina acumulada infiltrada, por tanto, se produce un almacenamiento de agua en la base granular. Dividiendo la lámina acumulada P_e por la porosidad de la base granular, se obtiene la altura real de agua al final de la precipitación. Para una duración D_m , esta altura alcanzará, al final del intervalo, un máximo h_{2m} ; se debe verificar que esta altura máxima sea menor o igual al espesor H_2 de esa capa.

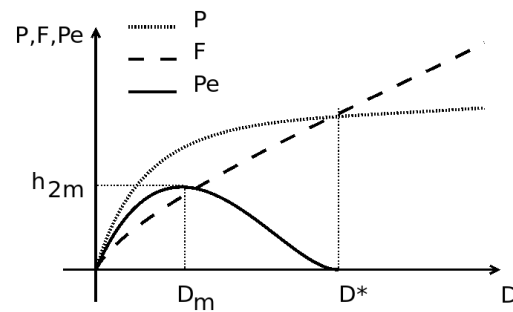


Figura 5. Modelo conceptual de funcionamiento hidrológico de la base granular, bajo precipitaciones de intensidad constante e igual recurrencia (elaboración propia)

Si se asume una distribución temporal de la precipitación $P(t)$, es decir que la misma no es constante en el tiempo, es posible aplicar el modelo conceptual descrito sustituyendo a P_e por:

$$P_e(D) = \begin{cases} \int_0^D (i(t) - f(t)) dt & \text{si } i(t) > f(t) \\ 0 & \text{si } i(t) \leq f(t) \end{cases} \quad (21)$$

En la práctica, como la función $i(t)$ viene dada en forma discreta como un hietograma de paso temporal (habitualmente) constante Δt , la integral presente en la Ec. (21) se resuelve numéricamente como:

$$\int_0^D (i(t) - f(t)) dt \approx \sum_{j=1}^n (i_j - f_{mj}) \Delta t \quad (22)$$

donde n es el número de intervalos de duración Δt en que se divide el hietograma y f_{mj} es la tasa media de infiltración en el intervalo j .

Dado que la porosidad η_2 es un factor de escala en la solución obtenida, es pertinente su adecuada caracterización. En caso de no disponer de información experimental sobre la misma, o para estimaciones iniciales, es posible utilizar la siguiente expresión, presentada por Wu y Yang (15) que permite estimarla con base al diámetro medio d_m del material granular:

$$\eta = 0.3 + 0.175e^{-0.095(d_m-1)} \quad (23)$$

donde d_m es el diámetro medio del material granular (mm).

Asimismo, de no contarse con determinaciones experimentales, es posible relacionar la conductividad hidráulica de la base granular con el diámetro del material y con la porosidad (16) como:

$$K = 200 \cdot d_m^2 \left(\frac{\eta}{1-\eta} \right)^2 \quad (24)$$

donde K es la conductividad hidráulica de la base granular (m/s) y d_m es el diámetro medio del material granular (m).

En el caso de pavimentos permeables con base granular de espesor constante inclinadas (pendiente transversal $\neq 0$), debe considerarse el ángulo de inclinación en el cálculo de la capacidad de almacenamiento, si la capacidad de infiltración de la subrasante es superada (5); esta situación es desfavorable, ya que el nivel de agua en la base granular alcanzará más rápidamente la altura máxima H_2 de esa capa, frente a la situación horizontal (Fig. 6).

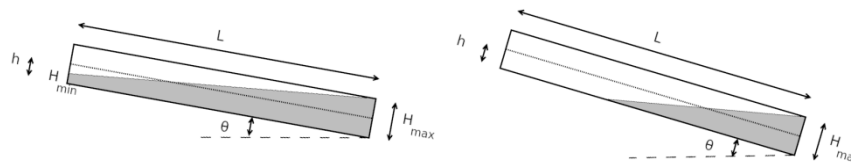


Figura 6. Efecto de la inclinación en la capacidad de almacenamiento de la base granular. A la izquierda: pendiente baja; a la derecha, pendiente alta (elaboración propia)

En este caso, debe considerarse explícitamente, para estimar el nivel máximo de agua en la base granular, el área poroso A. En caso de áreas rectangulares, puede reemplazarse por la longitud L del plano inclinado (Fig. 6). Asumiendo que la profundidad requerida h, correspondiente a la situación horizontal, ya ha sido corregida por la porosidad de la capa, entonces la profundidad máxima H_{max} (también corregida por la porosidad de la capa) viene dada por:

$$H_{max} = \begin{cases} h + \frac{L \cdot \text{tg} \theta}{2} & \text{si } h \geq \frac{L \cdot \text{tg} \theta}{2} \\ \sqrt{2Lh \cdot \text{tg} \theta} & \text{si } h < \frac{L \cdot \text{tg} \theta}{2} \end{cases} \quad (25)$$

donde H_{max} es la altura máxima del agua en la capa inclinada (m), h es la altura del agua equivalente en la capa horizontal (m), y $\text{tg} \theta$ es la pendiente superficial (adimensional).

La primera de las Ec. (25) corresponde a la situación de "pendiente baja" (Fig. 6, izquierda) mientras que la segunda corresponde a la situación de "pendiente alta" (Fig. 6, derecha). La Ec. (25) permite considerar, en forma simplificada y con base a consideraciones geométricas, la inclinación del pavimento permeable en el predimensionado del espesor de la base granular.

El modelo conceptual descrito, si bien no permite predecir la variación a lo largo del tiempo del nivel de agua en la base granular, sí permite establecer, bajo las hipótesis simplificativas ya indicadas, el espesor hidrológicamente necesario de esa capa, y puede ser utilizado para definir esta magnitud para, a posteriori, realizar un análisis de detalle basado en el modelo de balance descrito previamente.

Resultados y discusión

Ejemplo de aplicación

La gerencia de infraestructura de una cadena de centros comerciales ha decidido pavimentar en su sucursal de Río Cuarto (provincia de Córdoba), las áreas de estacionamiento con un pavimento de hormigón poroso. Debido a las características del suelo natural, es posible aprovechar su capacidad de infiltración y por tanto, se adopta un pavimento no drenado (Fig. 2, izquierda). El área de estacionamiento (de 11,900 m²) se aislará hidrológicamente de su periferia por medio de canales de guarda (Fig. 7), de modo que la única entrada de agua es la debida a la precipitación. La superficie pavimentada tendrá una pendiente media superficial del 1 %. Completan el diseño de esta área de estacionamiento, espacios verdes (550 m²) y, en correspondencia con las cunetas interiores, sectores de pavimento de hormigón tradicional (240 m²). La máxima longitud de escurrimiento en el pavimento poroso, perpendicular a las cunetas de hormigón tradicional, es de 28 m. El conjunto drena a una laguna de detención, donde también descarga, a través de conductos subterráneos, el desagüe pluvial de la construcción principal.

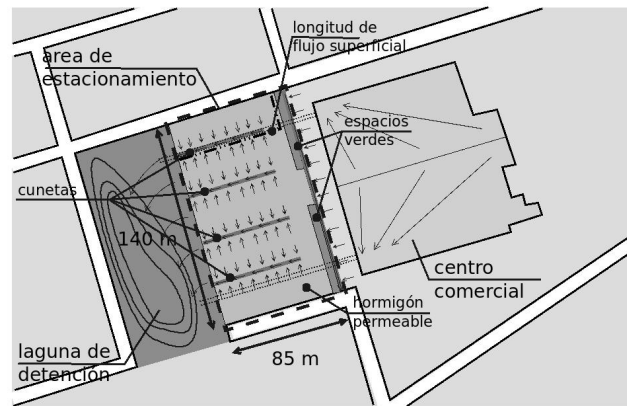


Figura 7. Centro comercial y área de estacionamiento (elaboración propia)

Por consideraciones mecánico-estructurales, la capa de hormigón poroso tendrá un espesor de 15 cm, mientras que la base granular deberá tener, al menos, un espesor de 35 cm. Los diámetros medios del material granular son, para estas capas y respectivamente, 15 mm y 30 mm. basándose en ensayos de laboratorio, la porosidad del hormigón poroso a fabricar es $\eta_1 = 27\%$. El suelo local (un limo arenoso) fue sometido a ensayos de infiltración, determinando los parámetros del modelo de Horton: $f_0 = 60$ mm/h, $f_b = 20$ mm/h, $k = 4$ h⁻¹. Se asume, como periodo de retorno de diseño, $T = 25$ años. Se pide: predimensionar la base granular y simular el funcionamiento hidrológico del pavimento permeable.

Datos

Precipitaciones. De acuerdo a Farías y Olmos (17) la relación intensidad-duración-recurrencia para la ciudad de Río Cuarto viene dada por una expresión estándar (Ec. 17) de la forma

$$i = \frac{1840.57T^{0.21}}{(D+23)^{0.92}} \quad (26)$$

Porosidades. En ausencia de información experimental, la porosidad η_2 de la base granular se estima con relación a su granulometría, a través de la Ec. (23), obteniéndose $\eta_2 = 0.311$. La porosidad η_1 de la capa de hormigón poroso, como se indicó, se define como: $\eta_1 = 0.27$.

Conductividades hidráulicas. En ausencia de información experimental, la conductividad hidráulica k_1 de la capa de hormigón poroso se estima con base a su porosidad antes establecida, a través de la Ec. (13), obteniéndose $k_1 = 0.66$ cm/s. La conductividad hidráulica k_2 de la base granular se estima con base a su porosidad antes establecida y a su granulometría, a través de la Ec. (24), obteniéndose $k_1 = 3.67$ cm/s.

Tiempo de concentración. Para fijar la duración crítica de la precipitación, que maximice el caudal superficial erogado, se estima el tiempo de concentración de la cuenca superficial constituida por el área de estacionamiento. Para ello, se utiliza la ecuación de la Federal Aviation Agency (13):

$$t_c = 22.73(1.1 - C)L^{0.5}S^{-0.33} \quad (27)$$

donde t_c es el tiempo de concentración (min), C es el coeficiente de escorrentía del Método Racional (adim.), L es la longitud del flujo superficial (km) y S es la pendiente superficial de la cuenca (m/km).

Para una longitud de flujo superficial de 113 m (Fig. 8), una pendiente de 10 m/km (1 %), y asumiendo válida una estimación preliminar de $C = 0.033$ se calcula un valor inicial de $t_c = 3.81$ min, asumiéndose $t_c = 5$ min.

Hietograma de diseño. Para realizar la simulación del funcionamiento hidrológico del pavimento permeable, se estableció un hietograma de diseño de duración igual al tiempo de concentración antes determinado, utilizando el Método del Bloque Alterno (12) con base a la relación iD dada por la Ec. (26), para el mismo periodo de retorno (25 años). Utilizando un intervalo de tiempo $\Delta t = 1$ min, y localizando el pico de la distribución en el segundo quintil, se obtiene el hietograma de la Fig. 8.

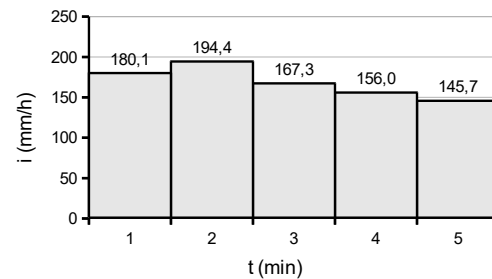


Figura 8. Hietograma de diseño (elaboración propia)

Predimensionado de la base granular

Para el predimensionado de la base granular se aplica la metodología descrita para duraciones D comprendidas entre 10 y 100 minutos. La tabla 1 resume el procedimiento de cálculo y los resultados para los primeros pasos temporales. En esta tabla, la columna [2] se determina en base a la Ec. (26); la columna [3] se obtiene multiplicando la columna [1] por la columna [2] (Ec. 18); la columna [4] mediante la Ec. (19); la columna [5] es la diferencia entre las columnas [3] y [4] (Ec. 20); y la columna [6] dividiendo la columna [5] por η_2 (Ec. 16). Como puede verse, el espesor H_2 requerido alcanza su máximo $H_2 = 103.7$ mm para una duración $D = 60$ min. En la Fig. 9 se grafican estos resultados.

Tabla 1. Predimensionado de la base granular

D (min)	i (mm/h)	P (mm)	F (mm)	Pe (mm)	H_2 (mm)
[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]
10	145.04	24.17	8.2	15.97	51.3
20	113.69	37.9	14.03	23.87	76.7
30	93.80	46.9	18.65	28.25	90.8
40	80.01	53.34	22.64	30.70	98.7
50	69.87	58.22	26.31	31.91	102.6
60	62.08	62.08	29.82	32.27	103.7
70	55.91	65.23	33.24	31.99	102.8
80	50.90	67.87	36.62	31.25	100.4
90	46.74	70.11	39.98	30.13	96.9
100	43.23	72.05	43.32	28.73	92.4

Dado que el plano de pavimento permeable está inclinado con $\text{tg } \theta = 0.01$ (1%), es pertinente corregir el valor máximo antes obtenido según lo indicado en la Ec. (25). Para una longitud de

escurrimiento $L = 28$ m, el valor crítico $L \cdot \tan \theta / 2 = 0.140$ m resulta ser mayor a h_{2m} , por lo cual, se está en condiciones de "pendiente alta". Consecuentemente, es válida la corrección dada por la segunda de la Ec. (25) y por tanto, se calcula el espesor hidrológicamente requerido de la base granular $H_2 = 24.1$ cm. Como este espesor es menor al establecido por consideraciones mecánico-estructurales, el espesor definitivo de la base granular será $H_2 = 35$ cm.

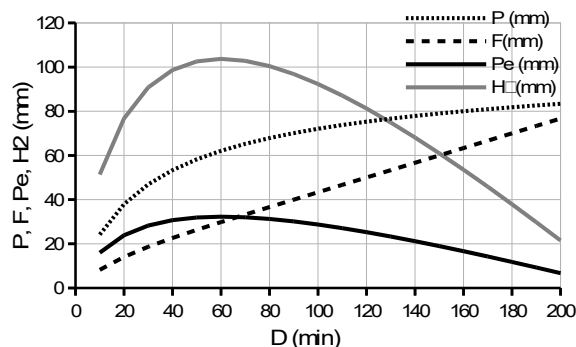


Figura 9. Predimensionado de la base granular (elaboración propia)

Con fines comparativos, se aplicó la metodología simplificada propuesta por Rodden et al. (7) considerando los siguientes parámetros: $E = fb = 20$ mm/h, $t_d = 15$ h, $h_{curb} = 12$ cm, $r_c = 0.11$, $h_c = 15$ cm, $r_s = 0.45$; la aplicación de la Ec. (1) arroja como resultado $h_s = H_2 = 36,2$ cm. Cabe indicar, sin embargo, que la elección del tiempo de detención t_d resulta arbitraria y añade una incertidumbre adicional al procedimiento.

Simulación del funcionamiento hidrológico del pavimento permeable

Para la simulación del funcionamiento hidrológico del pavimento permeable se aplica la metodología descrita anteriormente. Teniendo en cuenta los valores estimados de conductividad hidráulica K y los respectivos espesores H de las capas de hormigón poroso y base granular, es posible estimar los tiempos de traslado del flujo en esas capas (como el cociente H/K) en 22.6 y 9.5 segundos respectivamente. Por tanto, se adopta un intervalo de tiempo $\Delta t = 1$ min, lo que garantiza la hipótesis asumida. La tabla 2 resume el cálculo desarrollado, para los primeros intervalos de tiempo.

Tabla 2. Simulación del funcionamiento hidrológico del pavimento permeable

t (min)	t (h)	i (mm/h)	h₁ (mm)	h₂ (mm)	f_i (mm/h)	c_i (mm/h)	r_p (mm/h)	r_i (mm/h)
[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	[8]	[9]
0	0.00000	180.1	0	0	180.1	180.1	60.00	0.00
1	0.01667	194.4	0	9.6	194.4	194.4	57.42	57.42
2	0.03333	167.3	0	17.0	167.3	167.3	55.01	55.01
3	0.05000	156.0	0	23.0	156.0	156.0	52.75	52.75
4	0.06667	145.7	0	28.5	145.7	145.7	50.64	50.64
5	0.08333	0.0	0	33.6	0.0	0.0	48.66	48.66
6	0.10000	0.0	0	31.0	0.0	0.0	46.81	46.81
7	0.11667	0.0	0	28.5	0.0	0.0	45.08	45.08
8	0.13333	0.0	0	26.1	0.0	0.0	43.47	43.47
9	0.15000	0.0	0	23.8	0.0	0.0	41.95	41.95
10	0.16667	0.0	0	21.5	0.0	0.0	40.54	40.54

Cabe destacar que para el cálculo de los valores incógnita h_1 y h_2 ($t \geq 1$ min), en la Ec. (15) los valores de los miembros de la derecha (los que llevan subíndice i) corresponden al renglón superior en la tabla 2.

Como puede observarse, en ningún momento se acumula agua en la capa de hormigón poroso ($h_1 = 0$ para todo t) y la altura de agua máxima acumulada en la base granular ($h_2 = 33.6$ mm en $t = 5$ min) está muy por debajo del espesor $H_2 = 350$ mm de esa capa; por tanto, son válidas las hipótesis indicadas en el cálculo de f y c (columnas [6] y [7] respectivamente) y efectivamente no se produce escurrimiento superficial en el pavimento permeable.

En la Fig. 10 se presentan los resultados obtenidos: a la izquierda la variación de la altura de agua en la base granular, y a la derecha, las tasas de precipitación (intensidad de la lluvia) y recarga (infiltración en la base granular).

Nuevamente es necesario recordar que el modelo simplificado aplicado considera que las capas son horizontales, sin embargo, al aplicar la corrección geométrica dada por la Ec. (25) (y teniendo en cuenta las consideraciones ya indicadas en el predimensionado de la base granular) la altura máxima de agua acumulada en la base granular se incrementa a $H_{max} = 13.7$ cm, quedando aún por debajo del espesor $H_2 = 35$ cm de esta capa.

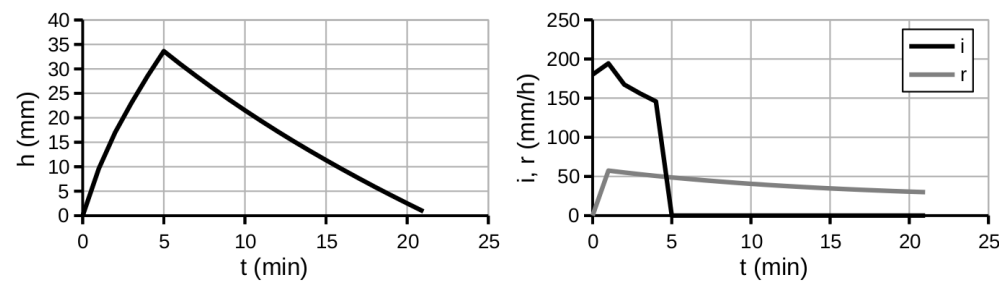


Figura 10. Resultados de la simulación del funcionamiento hidrológico del pavimento permeable: variación de la altura de agua en la base granular (izquierda); intensidad de la lluvia y tasa de recarga (derecha) (elaboración propia)

El cálculo se extiende hasta $t = 21$ min, ya que a partir de ese momento toda el agua almacenada en la base granular se infiltra en la subrasante ($h_2 = 0$) y por tanto, finaliza el evento.

Si bien la práctica del diseño hidrológico, a los fines de maximizar el caudal de escurrimiento superficial generado, asume una duración de la lluvia igual a la del tiempo de concentración ($t = 5$ min), el procedimiento anterior puede repetirse para otras tormentas de mayor duración, verificando el funcionamiento hidrológico del pavimento permeable bajo otros escenarios.

Conclusiones

En este trabajo se ha desarrollado y ejemplificado una metodología simplificada (basada en los conceptos del balance hidrológico) para analizar expeditivamente el funcionamiento y el desempeño hidrológico de los pavimentos de hormigón poroso. La capacidad de infiltración (y por tanto, de generación de escurrimiento superficial) de estos pavimentos, no depende exclusivamente de las propiedades de la capa superior de hormigón poroso sino también de la correspondiente base granular y de la subrasante de suelo natural, por lo que su análisis debe realizarse en conjunto.

El ejemplo desarrollado, a través de los procedimientos simplificados descritos en los apartados anteriores, ha tenido dos objetivos: ejemplificar numéricamente la aplicación de estos métodos a un caso típico de diseño hidrológico urbano, como también poner en evidencia las notables ventajas hidrológicas del uso de estos sistemas de drenaje urbano sustentables.

Los resultados del método descrito, debido a sus importantes simplificaciones, pueden alejarse del comportamiento real del sistema bajo análisis; en cualquier caso, permiten un adecuado dimensionado hidrológico preliminar del conjunto, que sirva de punto de partida para la aplicación de metodologías más rigurosas. Sin embargo, a la hora de su elección en el contexto de las aplicaciones ingenieriles, deben sopesarse las demás fuentes de incertidumbre involucradas, en particular las relacionadas con la caracterización física de los materiales existentes o disponibles como también la de las fuentes de información hidrológica consultadas.

La metodología propuesta desarrolla explícitamente las formulaciones necesarias para la implementación de métodos descritos en forma general en la literatura (18). La metodología propuesta ofrece ciertas ventajas respecto de procedimientos de cálculo anteriores: en lo relativo al predimensionado de la subbase granular, permite explícitamente considerar la duración de diseño, a diferencia de lo propuesto por Rodden et al. (7), donde es necesario establecer arbitrariamente el tiempo máximo de detención del agua o un volumen precipitado. En lo relativo al funcionamiento hidrológico del pavimento (Ec. (7)), la metodología propuesta permite visualizar explícitamente la evolución del nivel del agua en el pavimento; entre los procedimientos anteriores descritos, el único equivalente es el modelo SWMM5-LID (9); sin embargo, su aplicación implica integrar el pavimento poroso en un modelo computacional más complejo, lo que puede resultar excesivo para un análisis preliminar.

Se considera que la metodología propuesta puede ser de utilidad en las tareas de diseño hidrológico en el contexto del paradigma de los Sistemas de Drenaje Urbano Sustentables (SUDS), así como también en la enseñanza universitaria de grado y posgrado en el área del Drenaje Urbano.

Referencias

1. Chandrappa, A, Biligiri, K. Pervious concrete as a sustainable pavement material—Research findings and future prospects: A state-of-the-art review. *Construction and building materials*. 2016. 111:262-274.
2. Sonebi M, Bassuoni M, Yahia A. Pervious concrete: mix design, properties and applications. *RILEM Technical Letters*. 2016; 1:109-115.
3. Ferguson B. *Porous pavements*. Boca Raton, FL: Taylor & Francis; 2005.
4. Eisenberg B, Lindow K, Smith, D. *Permeable pavements*. Reston, VA: American Society of Civil Engineers; 2015.
5. Tennis PD, Leming ML, Akers, DJ. *Pervious concrete pavements* (No. PCA Serial No. 2828). Skokie, IL: Portland Cement Association; 2004.
6. Wanielista M, Chopra M, Spence J, Ballock C. *Hydraulic performance assessment of pervious concrete pavements for stormwater management credit*. Orlando, FL.: Storm Water Management Academy, University of Central Florida; 2007.

7. Rodden, R, Voigt, G, Smith, T. Structural and hydrological design of sustainable pervious concrete pavements. 2011 Congress et Exhibition de l'Association des Transports du Canada. Les Succes en Transports: Une Tremplin vers l'Avenir Transportation Association of Canada (TAC); 2011.
8. American Concrete Pavement Association. PerviousPave: Background, Purpose, Assumptions and Equations. American Concrete Pavement Association; 2013.
9. Rossman, LA. Storm Water Management Model User's Manual, Version 5.1. Cincinnati, Ohio, USA: US EPA National Risk Management Research Laboratory; 2015. Report No.: EPA-600/R-14/413b.
10. Hohaia, N, Fassman, E, Hunt, WF, Collins, KA. Hydraulic and hydrologic modelling of permeable pavement. World Environmental and Water Resources Congress 2011: Bearing Knowledge for Sustainability; 2011. p. 587-597.
11. Mogenfelt, P. Modeling LID-units in SWMM. Master of Science Thesis No. TVVR 17/5022. Division of Water Resources Engineering, Department of Building and Environmental Technology, Lund University; 2017. Disponible en: <http://lup.lub.lu.se/student-papers/record/8928265>
12. Chow VT, Maidment DR, Mays, LW Hidrología Aplicada. Santa Fe de Bogotá, Colombia: McGraw-Hill; 1994.
13. Tucci CEM. Hidrologia: Ciência e Aplicação, 3ª Ed. Porto Alegre, Brasil: Editora da Universidade. UFRGS/ABRH; 2004.
14. Montes F, Haselbach L. Measuring Hydraulic Conductivity in Pervious Concrete. Environmental Engineering Science. 2006; 23(6):960–969.
15. Wu W, Wang SSY. Formulas for Sediment Porosity and Settling Velocity. Journal of Hydraulic Engineering. 2006; 132(8): 858–862. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2006\)132:8\(858\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2006)132:8(858))
16. Schön J. Physical properties of rocks: A workbook. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier; 2011.
17. Farías, HD, Olmos, L. Validación de relaciones idf generalizadas a nivel regional en el norte argentino. XXI Congreso Nacional del Agua , Tucumán; 2007.
18. Mays, LW. Stormwater collection systems design handbook. Ucrania: McGraw-Hill LLC; 2001.