

Hormigón drenante: diseño, características y aplicaciones

M. F. Carrasco^{a*}, D. P. Rautenberg^b y M. J. Positieri^b

^{a*}Centro de Investigación y Desarrollo para la Construcción y la Vivienda (CECOVI, UTN-FRSF), CP S3004EWB, Santa Fe, Argentina. mcarrasco@frsf.utn.edu.ar

^bCentro de Investigación, Desarrollo y Transferencia de Materiales y Calidad (CINTEMAC, UTN-FRC), CP 5000, Córdoba, Argentina. dayana.rautenberg@gmail.com, mpositieri@gmail.com

Recibido: 17 de junio de 2021

Aceptado: 06 de septiembre de 2021

RESUMEN

El hormigón drenante es un tipo de hormigón especial cuyas aplicaciones se remontan a mediados del siglo XIX. Los materiales utilizados, los métodos de dosificación, las características y propiedades han ido evolucionando con el tiempo así también como la palabra con la que se denomina este tipo de hormigón. En la bibliografía se lo encuentra como hormigón “poroso”, “permeable”, “sin finos”... sin embargo no hay dudas en cuanto a que la función principal es permitir el paso del agua a través de su estructura. En este artículo se presenta una revisión de los criterios de selección de materiales, métodos de dosificación más destacados y se mencionan también las principales características, así como los entornos de sus propiedades más importantes (físicas, mecánicas, hidrológicas y ambientales) y que afectan más significativamente su empleo. Un ítem interesante es la revisión de algunas de las amplias aplicaciones desarrolladas en el país y otras internacionales, motivadas por su impacto ambiental positivo. Por último, se vierten comentarios sobre aspectos tales como la necesidad de normativa e implementación de estándares de diseño adecuados destacando que el hormigón drenante presenta excelentes posibilidades para ser utilizado en diversos ámbitos de la construcción, siendo necesaria una mayor difusión del tema y un acercamiento entre los desarrollos de laboratorio y la aplicación en campo para que esta tecnología sea utilizada con mayor facilidad.

PALABRAS CLAVE: Hormigón drenante, diseño, características/propiedades, aplicaciones

ABSTRACT

Pervious concrete is a special type of concrete used since mid-19th century. The materials used, mix design methods and the characteristics and properties have evolved over time as well as the name used to refer to this type of concrete. In the literature it is found as “porous”, “permeable”, “non-fines concrete”... however there is no doubt about its main function that is to allow the passage of water through its structure. This article presents a review of the material selection criteria, considerations about the most prominent mix design methods and most important characteristics and properties affecting its application (physical, mechanical, hydrological and environmental) are also mentioned. An interesting item lays on the review of a wide range of applications in our country and in other countries, motivated by their positive environmental impact. Last, comments are made on aspects such as the need of regulations and implementation of adequate mix design standards, highlighting that pervious concrete has excellent possibilities to be used in various construction areas, requiring a greater promotion and a closer relationship between laboratory developments and field application, so that this technology could be easily appropriate.

KEYWORDS: Pervious concrete, mix design, characteristics/properties, applications

Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de la licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC-BY-NC-SA 4.0).

Citar como: Carrasco, M. F., Rautenberg, D. P., y Positieri, M. J. (2022). Hormigón drenante: diseño, características y aplicaciones. *Revista Hormigón*, 61, 5–23. <http://id.caicyt.gov.ar/ark:/s27189058/k8kj29kpr>

1. Introducción

El hormigón drenante es un material con los mismos componentes básicos que un hormigón convencional pero que se diseña intencionalmente con un índice de poros conectados muy superior, del orden de 15 % a 30 %. Este alto índice de poros proporciona una serie de características hidráulicas tales como permeabilidad y volumen de vacíos, mecánicas como resistencia a compresión y resistencia a flexión, capacidad de drenaje, absorción de sonido y otras, que pueden ser de gran interés para una amplia variedad de aplicaciones.

La estructura interna de un hormigón drenante puede describirse como un conjunto de partículas de agregado grueso unidas entre sí por puentes constituidos por mortero (cemento y agregado fino) o pasta cementicia. Estos puentes son los que le proporcionan la resistencia al hormigón.

En la Fig. 1 se presenta un modelo de la estructura del hormigón drenante. Las partículas del agregado grueso, por lo general de un sólo tamaño, forman el esqueleto de hormigón y la pasta de cemento o el mortero unen dichas partículas [1]. Esta configuración permite que el agua pueda percolar rápidamente a través del hormigón en detrimento de su resistencia mecánica.

Durante la fase de proyecto de un hormigón drenante se deben cumplir requisitos de resistencia y de permeabilidad. Ambas exigencias son antagónicas ya que la mejora de una de ellas se realiza en detrimento de la otra y además se deben considerar otras propiedades tales como la durabilidad.

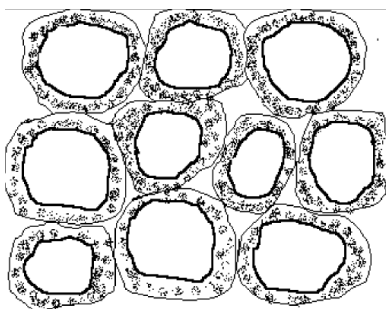


Figura 1. Modelo esquemático de hormigón drenante [1].

La obtención de un hormigón drenante adecuado no pasa por maximizar ninguna magnitud en particular, sino por alcanzar un equilibrio entre todas ellas.

Los beneficios de la aplicación de este hormigón se pueden mencionar brevemente:

- Reduce el escurrimiento de aguas pluviales
- Elimina la necesidad de estanques de retención y otras prácticas costosas de gestión de aguas pluviales
- Repone las capas freáticas, los acuíferos y favorece la expectativa de vida arbórea
- Permite un desarrollo territorial más eficiente
- Minimiza las inundaciones repentinas y el agua estancada
- Evita que el agua contaminada ingrese a ríos y arroyos
- Mitiga los contaminantes superficiales

Simultáneamente, se deben considerar algunas desventajas ya que los huecos se llenan con cierta facilidad por lo que se requiere limpieza periódica con equipos especiales y en zonas de bajas temperaturas existe una mayor dificultad para eliminar el hielo. Desde el punto de vista económico son inicialmente más costosos porque el diseño de un hormigón drenante requiere el uso de materiales con un control de calidad más estricto y dado que su puesta en obra es distinta a lo convencional, requiere de personal especializado. Si bien la inversión inicial puede resultar más cara, a largo plazo como proyecto de ingeniería resulta más económico.

2. Materiales para el hormigón drenante

2.1 Agregados

Diferentes autores han estudiado y proponen la utilización de agregados redondeados y triturados, tanto normales como livianos, para elaborar hormigón drenante. Se debe considerar que cualquiera de ellos debe cumplir con los requisitos del Reglamento CIRSOC 201 [2] y Normas IRAM 1512 [3],

1531 [4] y 1627 [5] (en otros países ASTM D448 [6] y C33/33M [7]). La utilización de agregado fino puede aumentar la resistencia a la compresión y la densidad, pero como consecuencia, reducir el caudal de agua a través de la masa de hormigón drenante. Sin embargo, hay investigadores que han llegado a la conclusión de que la incorporación de 5 % a 10 % de arena fina, como una relación de masa de agregado fino a agregado grueso, es óptima para mejorar la resistencia sin afectar significativamente la porosidad [8].

La calidad del agregado en el hormigón drenante es tan importante como en el hormigón convencional. Deben evitarse las partículas alargadas o escamosas, debe estar limpio y libre de recubrimientos, como polvo o arcilla, u otros químicos absorbidos que puedan afectar negativamente la interfase pasta-agregado o la hidratación del material cementicio. La humedad del agregado al momento de mezclar es importante, considerándose como situación óptima a la condición de saturada superficie seca (sss). Tal como para los hormigones convencionales, es necesario realizar las correcciones necesarias en función del contenido de humedad de los agregados. De lo contrario, el empleo de un agregado seco puede resultar en una mezcla que carece de la trabajabilidad para la colocación y compactación y un agregado demasiado húmedo puede contribuir al drenaje de la pasta, causando una obstrucción del volumen de espacios vacíos previsto.

El Instituto Americano del Hormigón (ACI, American Concrete Institute) sugiere el uso de agregados gruesos de un sólo tamaño o de tamaños entre 19 y 9,5 mm para hormigón drenante [9]. Sin embargo, algunos investigadores han usado agregados gruesos de menor tamaño entre 9,5 mm y 2,36 mm a los fines de aumentar las resistencias mecánicas [10]. Según Crouch et al. [11] el uso de agregado grueso de menor tamaño da como resultado mayor resistencia a la compresión que el uso de agregado grueso de mayor tamaño y una distribución de porosidad similar. Otra investigación llevada a cabo en la Universidad Estatal de Iowa indica

que el uso de agregado de un sólo tamaño proporciona una mayor tasa de permeabilidad, pero con una baja resistencia a la compresión del hormigón [12]. También se han utilizado agregados de un sólo tamaño de hasta 25 mm. Los agregados más grandes proporcionan una superficie más rugosa, lo que mejora la adherencia neumático-pavimento, la resistencia al deslizamiento y en consecuencia la seguridad. Para pavimentos de poco tráfico y estacionamientos, se prefieren los agregados de menor tamaño ya que su apariencia es más atractiva.

Además del tamaño de los agregados, la mineralogía, textura, forma y distribución granulométrica también influyen en la resistencia mecánica, la permeabilidad y la durabilidad a largo plazo del hormigón drenante. La irregularidad en la forma de los agregados influye en la disposición de las partículas, así como en la metodología y equipos de compactación que se deba adoptar. Los agregados de partículas redondeadas requieren menos esfuerzo de compactación que los agregados de partículas angulosas y según experiencias realizadas por Magesvari y Narasimha [13] el uso de agregados con partículas angulosas reduce las resistencias mecánicas del hormigón drenante. Sin embargo, las experiencias realizadas en el Centro de Investigación, Desarrollo y Transferencia de Materiales y Calidad (CINTEMAC-UTN) en Córdoba, Argentina, demuestran que se obtuvieron mejores resistencias en mezclas con agregados de partículas angulosas, tipo "piedra partida", en lugar de redondeadas, tipo "canto rodado", respetando para ambos casos un sólo tamaño de 9,5 mm [14].

Según Ćosić et al. [15] la mineralogía del agregado influye más en la distribución de los vacíos que el tamaño de las partículas. Los agregados utilizados son generalmente granito, dolomita, piedra caliza y cuarcita.

2.2 Materiales cementicios

Similar al hormigón convencional, en el hormigón drenante es posible utilizar

cementos para usos generales (IRAM 50000 [16]) y cementos para usos especiales (IRAM 50001 [17]). En la bibliografía también se indica el uso de cemento portland Tipo I y II de acuerdo con ASTM C150 [18], cemento mezcla que cumplan con ASTM C595 [19], en ambos casos cumpliendo la norma ASTM C1157 [20].

2.3 Materiales cementicios suplementarios

Además, se pueden usar materiales cementicios suplementarios (MCS) como cenizas volantes, puzolanas y escoria de alto horno granulada molida para modificar o mejorar el desempeño del hormigón, el tiempo de fraguado, la tasa de desarrollo de resistencia, permeabilidad, etc.

Lian y Zhuge [21] informaron que el uso de humo de sílice sin superplastificante puede no ser efectivo para aumentar la resistencia y la razón para este fenómeno es que la inclusión de humo de sílice daría lugar a la floculación de la pasta de cemento y, por lo tanto, intensificar la naturaleza porosa de la mezcla, evitando así el incremento de la resistencia. Las largas moléculas de superplastificante podrían envolver la pasta de cemento provocando la desfloculación y, por lo tanto, mejorar la resistencia.

Khankhaje et al. [22], en su investigación realizada sobre hormigón drenante sostenible mediante el reemplazo parcial del cemento por cenizas de combustible de aceite de palma, concluyen que el uso de este MCS contribuye a un mayor contenido de vacíos, mayor permeabilidad, menor resistencia a la compresión y tracción que el hormigón drenante sin MCS. Sin embargo, las resistencias a la tracción y a la compresión obtenidas estuvieron dentro del rango aceptable para rutas de bajo tránsito y estacionamientos. Además, el uso de cenizas de combustible de palma contribuirá a reducir los materiales de desecho de la industria.

De acuerdo con la revisión de la literatura, no existe una estandarización de las características y porcentajes ideales de MCS que se pueden incorporar a las mezclas de

hormigón drenante con el fin de brindar resultados específicos en las resistencias mecánicas y la permeabilidad.

2.4 Agua

El agua hidrata el cemento para formar la unión entre las partículas del agregado, generando una mezcla trabajable y proporcionando su resistencia mecánica final. Debido a que el hormigón drenante es muy sensible a los cambios en el contenido de agua, la cantidad precisa de agua es crítica y por lo tanto es necesario realizar ajustes *in-situ* [23].

En lo que respecta a la calidad del agua, deben respetarse los mismos límites establecidos para los hormigones convencionales para los contenidos de impurezas. Estos requisitos adquieren mayor relevancia dado que cualquier afectación a la resistencia y durabilidad de la pasta de cemento, repercutirá de modo directo en el desempeño del hormigón drenante.

2.5 Aditivos

Se pueden utilizar aditivos químicos en hormigón drenante para lograr propiedades mejoradas o diferentes. Los retardadores o aditivos estabilizadores de la hidratación se usan comúnmente para superar los problemas asociados con el tiempo de fraguado rápido del hormigón drenante, mientras que un reductor de agua de alto rango siempre se usa para ayudar en la colocación de la mezcla de hormigón drenante actuando como un lubricante entre agregados entrelazados debido a su baja trabajabilidad. Los aditivos incorporadores de aire que se utilizan en países con períodos de temperaturas bajo cero, reducen el daño en el hormigón drenante por congelamiento-deshielo. Los aditivos modificadores de la viscosidad son útiles para prevenir el escurrimiento de la pasta.

En diversas experiencias se ha verificado que la utilización de un aditivo a base de látex, reduce la energía de compactación necesaria

disminuyendo los costos operativos y mejora el comportamiento mecánico del hormigón frente a esfuerzos de compresión, flexión y abrasión [24-27].

2.6 Otros materiales

También se están usando diferentes agentes poliméricos y microfibras con el fin de aumentar la resistencia y la durabilidad [28]. Las microfibras son útiles para prevenir el agrietamiento por contracción plástica y pueden mejorar la resistencia a la abrasión y la durabilidad al congelamiento y deshielo. Un estudio realizado por Kevern et al. [12], especifica la dosis de fibra óptima para procurar permeabilidad y resistencia a la abrasión entre $1,5 \text{ kg/m}^3$ y $3,0 \text{ kg/m}^3$, con longitud de fibra de 56 mm.

Ha de considerarse también la importancia que hoy se les da a las terminaciones de los pavimentos, por ejemplo el color, con respecto a la sustentabilidad. En países desarrollados, la tecnología del color ya forma parte de la tecnología de materiales de la construcción, con colores que pueden ir desde tonos naturales, marrón y verde, para integrar el hormigón con el paisaje circundante y reducir la ganancia de calor; hasta tonos de contraste, amarillo y blanco, que permiten localizar e identificar distintas zonas de circulación. En el Centro de Investigación, Desarrollo y Transferencia de Materiales y Calidad (CINTEMAC-UTN) se diseñaron mezclas incorporando distintos pigmentos y manteniendo constantes los volúmenes de agregado grueso, materiales cementicios y agua como una forma de agregar valor estético al hormigón drenante. Los resultados obtenidos de ensayos de resistencia a compresión mostraron que la incorporación de los pigmentos tuvo efectos diversos, ya que la serie con pigmento amarillo superó los valores correspondientes a la serie de referencia (sin pigmento), en tanto que la serie con pigmento verde presentó una disminución significativa respecto de la misma serie de referencia [14].

3. Diseño de mezclas

El hormigón drenante debe tener adecuada "trabajabilidad" en estado fresco y satisfacer los requisitos mínimos de resistencia y durabilidad en estado endurecido, tal como se exige al hormigón convencional. A esto, debe sumarse el requisito adicional de elevada permeabilidad [29]. La permeabilidad está determinada por la macroporosidad originada en la cantidad justa de mortero o pasta, en la vinculación entre poros y la geometría de los poros y conductos que se forman. A mayor porosidad, se obtendrá una mayor permeabilidad, pero a expensas de una menor resistencia mecánica. Por ello, un diseño de mezcla adecuado para el hormigón drenante consiste en una composición equilibrada de materiales para garantizar el mejor rendimiento en términos de permeabilidad, resistencia y durabilidad.

En ausencia de una guía de diseño de mezcla normalizada, varios investigadores y profesionales han utilizado procedimientos sistematizados propuestos por diferentes organismos [9,26], mientras que otros han investigado diferentes mezclas y dosificaciones para lograr la resistencia deseada y los canales porosos que permitan una rápida infiltración de aguas pluviales.

Cuando el hormigón se somete a carga, ésta se transfiere a través de la pasta (materiales cementicios y suplementarios + agua + aditivos) entre agregados. La resistencia del agregado es superior a la de la pasta, el espesor de la pasta es muy fino y la interfaz entre los agregados resulta relativamente débil. Por lo tanto, aumentar el espesor/superficie de pasta (sin disminuir los espacios vacíos) y mejorar su resistencia son las claves para mejorar la resistencia del hormigón drenante. El tamaño de las estructuras de los poros (espacios vacíos) y los espesores de la pasta se pueden identificar utilizando microscopio electrónico de barrido, tomografía computarizada o tomografía de rayos X [30].

La Tabla 1 proporciona rangos típicos de proporciones de materiales para hormigón drenante [23].

Nguyen et al. [10] desarrollaron un diseño de mezcla de hormigón drenante y una hipótesis de dosificación basada en la teoría del exceso de pasta. Este método se basa en la cuantificación de la capa de pasta de cemento que recubre el agregado y en el supuesto de que la pasta de cemento actúa sólo como recubrimiento; no llena el vacío entre las partículas de agregado. Esta propuesta se divide en tres pasos: la determinación del volumen de agregados, el volumen de pasta de cemento y la razón a/c. El volumen de pasta de cemento requerido para proporcionar un recubrimiento suficiente se determina dividiendo este volumen por el área superficial de partículas de agregados supuestos esféricos [10,25,26].

Desde el Instituto del Cemento Portland Argentino (ICPA) se desarrolló un método simple para el diseño de mezclas de hormigón drenante, que no exigía el empleo de equipamiento sofisticado. De acuerdo con los autores, este método proporcionaba una primera aproximación, debiendo ajustarse luego las mezclas por correcciones sobre pastones de prueba [29]. Una vez establecida la porosidad de diseño, este porcentaje de vacíos debe mantenerse en forma homogénea en toda la masa del hormigón, por lo que impone un condicionante a la fluidez del mortero y a la forma de compactación.

Dado que la cantidad de agregado grueso que contiene un metro cúbico de hormigón drenante en estado fresco es menor que la cantidad de piedra compactada en igual volumen, los autores establecen una relación entre ambos parámetros que denominan “k” y cuyo valor determinado experimentalmente se encuentra entre 0,85 y 0,92. En este método se establece que, aun cuando las pruebas de laboratorio indiquen que es posible obtener adecuada permeabilidad para porosidades del orden del 12 % al 15 %, la experiencia internacional demuestra que es necesaria una porosidad del orden del 20 % para reducir los problemas de colmatación [29].

En el método propuesto por Castro et al. [31] las variables independientes consideradas son el porcentaje real de vacíos y la razón agua/cemento (a/c) de la mezcla, con el objetivo de caracterizar de mejor forma el comportamiento en estado fresco, lograr mayor certeza sobre el comportamiento mecánico e hidráulico en estado endurecido y optimizar el uso del cemento para lograr las mayores resistencias a flexotracción para cada razón a/c. Este método se basa en la cantidad de vacíos disponibles originalmente en el agregado y que es reducido al agregar la pasta de cemento. Sin embargo, al introducir la pasta, esta no solamente llenará los vacíos del agregado, sino que también se introducirá entre las partículas, separándolas e incrementando el volumen de hormigón. Durante la construcción, el material se compactará y se obtendrá una densidad real compactada.

Tabla 1. Valores típicos de proporciones en la dosificación del hormigón drenante [23].

Material	Proporciones
Material cementicio (mc) [kg/m ³]	270 - 415
Agregado (fino Af, grueso Ag) [kg/m ³]	1190 - 1480
Relación a/mc, en peso (*)	0,27 - 0,34
Relación Ag/mc, en peso (*)	4 - 4,5 : 1
Relación Af/Ag, en peso (**)	0 - 1 : 1

(*) Se han usado relaciones más altas, pero reduce significativamente las resistencias y la durabilidad.

(**) La adición de agregado fino disminuirá el contenido de vacíos y aumentará la resistencia.

Los autores definen a la relación entre la densidad real compactada y la densidad teórica como Factor de Compactación (FC) el cual adopta un valor en torno a 0,95. La variable FC resulta similar a la variable b/b_0 donde b_0 y b : son los pesos unitarios secos con y sin compactar respectivamente del agregado grueso (concepto usado en el ACI 211.1 [32] para dosificar hormigones convencionales), que compara la cantidad de agregados presentes en un volumen de hormigón con la cantidad de agregado presente en el mismo volumen, considerando sólo agregados secos. Asimismo, estos autores establecen que asociado a un 15 % de vacíos se encuentra una tasa de infiltración cercana a 3,5 mm/s. Este valor es considerado en este método como la mínima tasa de infiltración aceptable para considerar como porosa a una mezcla [31,33].

Otros investigadores dosificaron mezclas de hormigón drenante en función de la relación entre el volumen de pasta (PV) respecto a los huecos entre partículas (IPV) y concluyeron que las relaciones PV/IPV más altas producían resistencia a compresión y durabilidad mejoradas, pero porosidad y permeabilidad reducidas. Una relación PV/IPV del 50 % proporcionó un equilibrio óptimo entre resistencia y permeabilidad [25,26].

Como se expuso anteriormente, la granulometría de agregados para el hormigón drenante consiste típicamente en agregados gruesos de un solo tamaño o una mezcla binaria de agregados gruesos con la cantidad óptima de cemento para recubrir y unir los agregados [24]. Sin embargo, se plantea que se requiere una pequeña cantidad de agregado fino, típicamente del 5 % al 7 %, para mejorar la durabilidad ante ciclos de congelamiento y deshielo y la resistencia mecánica [34]. La porosidad de un hormigón drenante típico varía en el rango de 15 % a 25 % (con un mínimo de 15 %) según lo prescrito por la Asociación Nacional de Hormigón Premezclado (NRMCA) [23].

La razón a/c , que es una variable muy importante, es menor en comparación con las

que se utilizan en la mezcla de hormigón convencional, e históricamente ha variado en el rango de 0,27 a 0,34, alcanzando en algunas experiencias valores de 0,43, con la intención principal de proporcionar una capa de pasta suficiente para recubrir los agregados. Se asume que la trabajabilidad es satisfactoria cuando se aprieta y suelta una muestra de la mezcla, lo que da como resultado una mezcla que no se desmorona ni queda libre de huecos [9,23-26].

Además, la relación agregado-cemento ha variado en el rango de 4:1 hasta 12:1. Por lo general, el volumen de agregados en el hormigón drenante es de aproximadamente 50 % a 65 % en comparación con el hormigón convencional, que es de aproximadamente 60 % a 75 % [24,25].

En la Tabla 2, se resumen las características más significativas de los métodos de dosificación con mayor difusión en nuestro país.

4. Características del hormigón drenante

El hormigón drenante ha sido reconocido por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) como una buena práctica de gestión para abordar una cuestión ambiental que es la presencia de contaminantes como el petróleo y otros líquidos de hidrocarburos que se encuentran en la superficie de los estacionamientos. La estructura abierta del hormigón drenante proporciona un medio para que bacterias aeróbicas descompongan muchos de los contaminantes que se filtran desde los automóviles estacionados hacia el pavimento.

El hormigón drenante también contribuye a mejorar la calidad del aire al reducir el calentamiento presentando un color más claro y menor densidad, disminuyendo el impacto de la isla de calor (UHI, por sus siglas en inglés). El efecto de la isla de calor se produce cuando las áreas cubiertas por árboles se reemplazan con áreas oscuras como las de la superficie del pavimento y se caracteriza por elevar la temperatura

Tabla 2. Características significativas de métodos de dosificación de hormigón drenante.

Métodos de diseño de mezclas	Datos para el diseño de mezclas	Datos de los materiales para el diseño de la mezcla
ACI 522 [9]	<ul style="list-style-type: none"> • Contenido de espacios vacíos • y/o tasa de percolación; • Resistencia a la compresión 	<ul style="list-style-type: none"> • Peso unitario y contenido de espacios vacíos del agregado • Densidad relativa y absorción de los agregados • Granulometría del agregado • Cantidad de agregados finos
NRMCA [23]	<ul style="list-style-type: none"> • Contenido de espacios vacíos y • Grado de compactación; • Relación a/mc; • % de adición activa como reemplazo del cemento 	<ul style="list-style-type: none"> • Peso unitario y contenido de espacios vacíos del agregado • Densidad relativa y absorción de los agregados • Granulometría del agregado • Cantidad de agregados finos • Densidad relativa de la adición activa
ICPA [29]	<ul style="list-style-type: none"> • Coeficiente K: ($0,85 \leq K \leq 0,92$) $K= 0,9$ • Porosidad de diseño η_d: $0,15 \leq \eta_d \leq 0,20$ • Relación a/mc: $0,3 \leq a/mc \leq 0,35$ • Relación Cemento/Arena (Ce/Ar): $1,0 \leq Ce/Ar \leq 1,15$ 	<ul style="list-style-type: none"> • Densidad de los materiales componentes • P.U.V. agregado grueso (S y C)
Castro et al. [31]	<ul style="list-style-type: none"> • Contenido de Pasta V_p: óptimo= 250 dm^3 • Factor de compactación: $0,84 \leq F_c \leq 0,99$ • Porosidad de diseño: $0,15 \leq \eta_d \leq 0,20$ • Relación a/mc: $0,28 \leq a/mc \leq 0,40$ 	<ul style="list-style-type: none"> • Densidad de los materiales componentes • P.U.V. agregado grueso (S y C)
Nguyen et al. [10]	<ul style="list-style-type: none"> • Cantidad de agregado fino: óptimo= 7 % en peso de agregado grueso • Compactación del hormigón (inferior a 10 kPa) • Volumen de vacíos • Relación a/mc: $0,34 \leq a/mc \leq 0,40$ → Grado de hidratación 	<ul style="list-style-type: none"> • Tamaño máximo de agregado grueso

promedio de hasta 12 °C considerando este aumento entre un área urbana y su campo circundante. Este efecto de isla de calor aumenta la producción de ozono a nivel del suelo hasta en un 30 %.

Otra característica está vinculada a las superficies de hormigón, tanto las permeables

como las convencionales, ya que tienen un albedo mucho más alto (una medida de reflectancia) que los materiales de pavimentación como el asfalto. Un alto albedo reduce los requisitos de iluminación necesarios o aumenta el brillo de un área determinada con los mismos costos de energía. El color inherentemente claro del

hormigón refleja de forma natural el calor y la luz. Los estudios han demostrado que es posible hasta un 30 % de ahorro en los costos de iluminación sobre otros tipos de pavimento debido a la reflectividad de los pavimentos de hormigón [23].

En lo que se refiere a la seguridad vial, con el propósito de ofrecer condiciones seguras de transitabilidad en cualquier condición, se comenzaron a evaluar los pavimentos de elevada rugosidad superficial (mejor adherencia), pero los problemas derivados del confort de tránsito, ruidos y vibraciones, hicieron que se desestimara esta solución y se comenzara a evaluar el comportamiento de pavimentos drenantes. La elevada permeabilidad provoca una infiltración inmediata del agua en el seno del pavimento, y de esta forma se reduce o elimina el “salpicado” (splash) y la niebla y se evita la ocurrencia de hidropneumático. Aún en condiciones reales de congelamiento, la falta de acumulación de agua en superficie evita la formación del hielo, conservándose valores importantes de adherencia vehículo-pavimento.

Una característica más, a destacar, es el comportamiento de este hormigón frente al ruido y la contaminación acústica. La estructura abierta del hormigón drenante provoca una diferencia en el tiempo de llegada entre ondas sonoras directas y ondas sonoras reflejadas. Esta diferencia disminuye la intensidad del nivel de ruido, lo que hace que los pavimentos drenantes presenten una mayor absorción sonora [35]. Por esta razón el hormigón drenante también es utilizado como barrera sonora en otras aplicaciones.

4.1 Propiedades del hormigón drenante

La porosidad del hormigón drenante se consigue mediante una curva granulométrica discontinua en la que se disminuye o elimina el contenido de los agregados finos en relación a las curvas granulométricas usuales en hormigones convencionales [36]. Para que

el hormigón sea considerado drenante debe tener un mínimo de 15 % de huecos, sin sobrepasar el 25 % para evitar problemas de estabilidad [33]. Dependiendo de las exigencias requeridas al hormigón drenante pueden agregarse adiciones minerales y aditivos químicos con la finalidad de mejorar, por ejemplo, los requisitos mecánicos y la durabilidad dependiendo de su aplicación.

El correcto diseño de las mezclas de hormigón permitirá cumplir con algunos de los requisitos exigidos para cada aplicación y obtener la resistencia y permeabilidad especificadas. Las principales variables que afectan el comportamiento del hormigón drenante son: la granulometría de los agregados, el contenido de cemento, la razón a/c y el contenido de vacíos. Otras variables a tener en cuenta en estos hormigones son: relación agregado grueso/cemento, relación agregado fino/agregado grueso, densidad del hormigón y uso de adiciones minerales y/o aditivos químicos.

La mezcla de hormigón drenante en estado fresco es rígida en comparación con el hormigón tradicional. El asentamiento, cuando se mide, es generalmente menor a 20 mm, aunque se han utilizado asentamientos de hasta 50 mm. Otros métodos como el de Hand-Squeeze [23] que se presenta en la Figura 2 y el de tronco de cono de Abrams invertido (NRMCA) son ensayos muy comunes para determinar la consistencia de la mezcla. La cantidad de agua utilizada en una mezcla es crítica.

Un exceso de agua generaría segregación y una escasez de agua dará lugar a pelotas en la mezcla dentro de la hormigonera y a un tiempo lento de descarga. La cantidad correcta de agua impartirá un aspecto húmedo y brillante. Si de apretar y soltar un puñado de mezcla resulta que no se desmorona, se trata de una mezcla muy seca; si pierde su estructura y la pasta fluye fuera de los agregados, significa que está muy húmeda.



Figura 2. Ensayo de Hand-Squeeze. Muestras de hormigón drenante con diferentes contenidos de agua, formados en una bola: (a) muy poco contenido de agua, (b) cantidad adecuada de agua y (c) demasiado contenido de agua (adaptado de [23]).

Cuando esta mezcla se coloca y compacta, los agregados se adhieren firmemente entre sí y la terminación superficial se presenta como una matriz abierta característica.

El peso unitario o la densidad aparente es un dato interesante ya que, debido al elevado contenido de vacíos, el peso unitario de las mezclas de hormigón drenante puede ser aproximadamente del 70 % de las mezclas de hormigón tradicionales, variando entre 1700 kg/m^3 y 2000 kg/m^3 [36]. Esta propiedad se ve significativamente afectada por el tipo, duración y energía puesta en juego en los procesos de compactación de las mezclas. En general, la energía de compactación aplicada suele ser menor en comparación con la compactación de laboratorio, por lo cual algunos investigadores han informado diferencias entre la densidad in-situ y la medida en laboratorio de hasta 45 % [37].

El tiempo de trabajo del hormigón suele reducirse para las mezclas de hormigón drenante. Por lo general, lo que se recomienda es un lapso de una hora entre el mezclado y la colocación. Sin embargo, esto se puede controlar utilizando aditivos que prolongan el tiempo de trabajo hasta en 1,5 horas, dependiendo de la dosis de aditivo empleada.

Con respecto a la permeabilidad, el flujo de agua a través de este hormigón depende de los materiales y las operaciones de colocación, entre otros. Los índices de flujo típicos a través del hormigón drenante varían entre $120 \text{ litros/m}^2/\text{min}$ ($0,2 \text{ cm/s}$) y

$320 \text{ litros/m}^2/\text{min}$ ($0,54 \text{ cm/s}$), con velocidades de hasta $700 \text{ litros/m}^2/\text{min}$ ($1,2 \text{ cm/s}$) e incluso se han medido tasas más altas en el laboratorio.

El hormigón drenante ofrece resistencias medias a compresión entre 15 MPa y 20 MPa [36]. A nivel experimental Yang y Jiang [1] han logrado resistencias de 50 MPa mediante la adición de humo de sílice, superplastificante y polímeros orgánicos, obteniendo un hormigón drenante apto para todo tipo de vía urbana, ya sea en capas superficiales o de base. En cualquier caso, es necesaria la adición de polímeros o un mayor contenido de cemento para mantener un alto índice de huecos con una adecuada resistencia a los esfuerzos tangenciales del tránsito.

Al igual que con cualquier hormigón, las propiedades y combinaciones de materiales específicos, así como las técnicas de colocación y las condiciones ambientales, determinarán la resistencia efectiva en el lugar. Los testigos extraídos de la estructura son la mejor medida de la resistencia a compresión, ya que las diferencias de compactación hacen que las probetas moldeadas sean menos representativas del hormigón colocado en obra.

La resistencia a la flexión en hormigones drenantes generalmente varía entre aproximadamente 1 MPa y 3,8 MPa. Hay muchos factores que influyen en la resistencia a la flexión, particularmente el grado de compactación, la porosidad y la relación agregado-cemento.

La contracción por secado en el hormigón drenante se desarrolla antes que en el hormigón convencional, pero su magnitud es mucho menor. Los valores específicos dependerán de las mezclas y materiales utilizados [23]. El bajo contenido de pasta y mortero del material es una posible explicación. Aproximadamente del 50 % al 80 % de la contracción se produce en los primeros 10 días, en comparación con el 20 % al 30 % en el mismo período para el hormigón convencional. Debido a esta menor contracción y a la textura de la superficie, muchos hormigones drenantes se fabrican sin juntas de control y se les permite agrietarse al azar.

Los beneficios ambientales descritos justifican plenamente la importante expansión en su uso en los países desarrollados. Lamentablemente en nuestro país no se ha extendido aún la aplicación de esta tecnología que conlleva importantes beneficios económicos y ambientales, quizás en buena medida debido a que existe cierta suspicacia a utilizar este material sin saber a ciencia cierta su comportamiento.

5. Evolución de las aplicaciones

Las aplicaciones del hormigón drenante son muy diversas y pueden verse resumidas en la Fig. 3. Típicamente se emplea hormigón drenante sin armaduras de refuerzo en todas estas aplicaciones debido al elevado riesgo de corrosión de las barras de acero embebidas en la estructura abierta del material [9,24].

Las primeras referencias al empleo del hormigón drenante datan de mediados del siglo XIX (Fig. 4). En 1852, fue utilizado por primera vez en dos viviendas en el Reino Unido. No hay otras menciones en la literatura hasta 1923, cuando un grupo de 50 viviendas de 2 plantas fueron construidas en Edinburgo (Escocia). Sobre finales de la década de 1930, la Scottish Special Housing Association Limited adoptó el uso del hormigón drenante para la construcción residencial y en 1942, se empleó en la construcción de más de 900

viviendas. Luego de la 2da. Guerra Mundial, la demanda de vivienda, la necesidad de disponer escombros, el menor consumo de cemento, la escasez de mano de obra y la reducida disponibilidad de otros materiales (como los ladrillos) impulsaron la utilización de este material fundamentalmente en Europa [9].

A partir de la década de 1970, se comienzan a registrar aplicaciones en pavimentos destinados a estacionamientos, caminos de bajo tránsito y banquetas [9], lo que fue intensificándose y diversificándose en función de las posibilidades de control de volúmenes de escorrentía pluvial y sus niveles de contaminación, reducción de efectos de hidroplaneo, así como de reducción de ruidos en calzadas y de requerimientos de desagües convencionales [24,38].

Un pavimento drenante es una estructura con capacidad portante que es permeable al agua y que se coloca sobre una capa de acumulación de agua. La principal diferencia entre un pavimento drenante y uno convencional es la permeabilidad de la superficie y la capacidad de almacenamiento de la subbase [39]. La Fig. 5 presenta una sección general de este tipo de pavimentos. Una capa de geotextil no tejido se coloca debajo de una capa de piedra drenante para actuar como un medio filtrante, antes que la infiltración de la precipitación alcance el suelo [24,40]. En estos pavimentos pueden utilizarse geotextiles entre la capa de hormigón drenante y el lecho de agregados drenantes o entre éstos y la subrasante. El geotextil superior es opcional ya que los resultados de diferentes estudios resultan contradictorios en relación a su efectividad, en tanto que la membrana inferior se aplica habitualmente, pudiendo ser permeable si se requiere la infiltración hacia el suelo o impermeable, si no hay necesidad de infiltración o si se requiere la reserva del agua para otros fines [25].

La infiltración del agua de lluvia ayuda a modificar el ciclo del agua urbana para que vuelva a parecerse en alguna medida al ciclo natural, incrementando la recarga de agua y

Pavimentos	Vehiculares Peatonales Cocheras Solados permeables Decks para piscinas Corrales
Bases para pavimentos	
Drenaje urbano	Superficial Reguladores de excedentes pluviales
Protección de taludes	Drenes de estabilización Recubrimiento
Filtración de agua	Drenes para recarga de acuíferos Revestimientos de paredes para pozos de agua perforado Filtración y purificación de agua de escorrentía pluvial Lecho de lodos para plantas de tratamiento de aguas residuales
Aislación	Paneles aislantes térmicos Paneles aislantes acústicos Barreras sónicas

Efecto físico
Efecto químico
Efecto biológico

Figura 3. Diversidad de aplicaciones del hormigón drenante.

evapotranspiración mientras que reduce la presión sobre la infraestructura urbana existente [39].

A pesar de los diversos impactos ambientales positivos, la principal aplicación del hormigón drenante se mantiene limitada a estacionamientos, veredas y caminos. Esto se atribuye a las desventajas inherentes a su estructura porosa aleatoria, así como a su limitada resistencia, su susceptibilidad a la colmatación y aspectos concernientes a la durabilidad. No obstante, con el creciente interés en el desarrollo sustentable junto con recientes avances en el hormigón drenante, se ha verificado un incremento en su aplicación para la construcción de pavimentos [9,38,40].

Alrededor de 1970, la Agencia de Protección Ambiental (EPA) en Estados Unidos adoptó una política que recomienda el uso del hormigón drenante como parte de sus Buenas Prácticas de Manejo para que las comunidades puedan mitigar el problema de las escorrentías pluviales [9]. Adicionalmente, los estacionamientos de hormigón drenante han sido seleccionados para atacar el efecto de isla de calor en un programa del estado de California denominado “Cool Communities Project”, ya que la temperatura del aire sobre el hormigón drenante es generalmente más fría que sobre concretos asfálticos [41]. El hormigón drenante también reduce la acumulación de nieve y formación de hielo y es considerado no contaminante para el

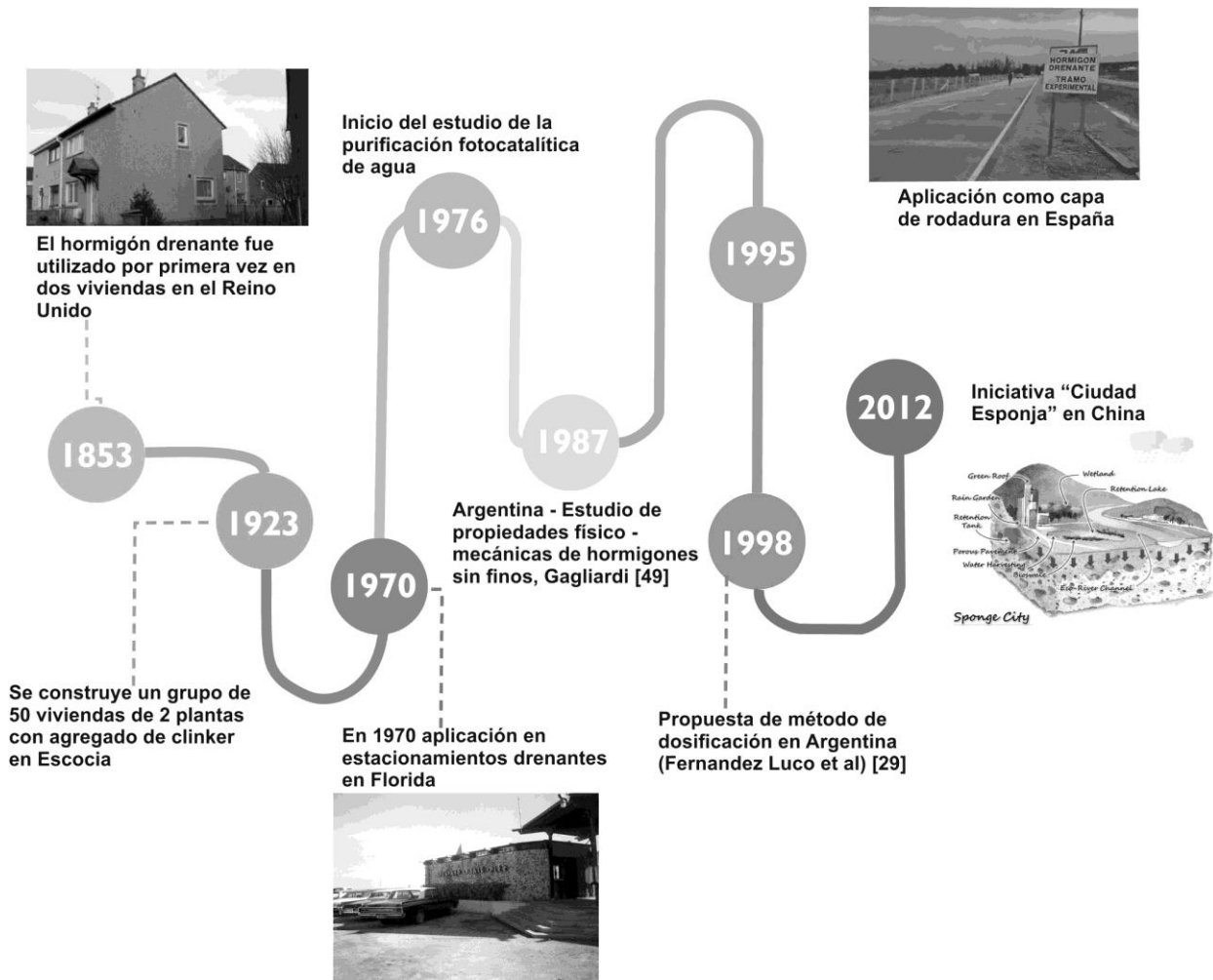


Figura 4. Evolución histórica de las aplicaciones del hormigón drenante.

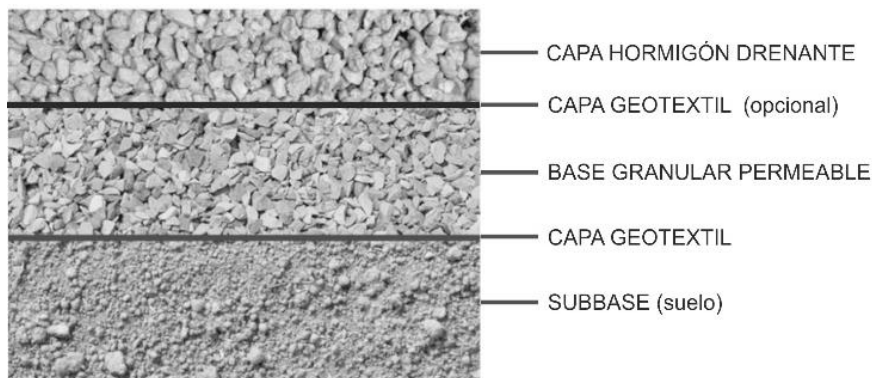


Figura 5. Sección típica de un pavimento de hormigón drenante [40].

ambiente. En climas fríos, porosidades del orden de 15 % a 25 % probaron casi eliminar el riesgo por congelamiento, a menos que el hormigón pueda mantenerse saturado y se han utilizado aditivos incorporadores de aire

para incrementar la resistencia al congelamiento y deshielo [9].

En la práctica, para el diseño de los pavimentos drenantes destinados a

estacionamientos se utilizan espesores de 125 mm a 300 mm, similares a los empleados en calzadas de bajo tránsito, en tanto que para las capas adheridas se han ejecutado capas de sólo 50 mm [9].

En la década de 1990, investigadores del Instituto Eduardo Torroja, diseñaron dos tramos experimentales construidos con maquinaria habitual para la ejecución de pavimentos asfálticos, que a pesar de registrar niveles de tránsito equivalente a dos millones de vehículos pesados de 13 t o superior a 300 camiones pesados por día, aún se encuentran en servicio. El tipo de material empleado se denominó hormigón poroso de altas prestaciones (HPAP), caracterizado por tener una estructura con más de 20 % de huecos interconectados entre sí, resistencia mecánica a flexotracción a 1 día mayor a 3,5 MPa y a 28 días mayor a 4,5 MPa [42].

En Estados Unidos, realizaron investigaciones en dos calles colectoras, construidas con hormigón drenante, en uso por 20 años. Las evaluaciones de índice de pavimentos (PCI) demostraron que ese hormigón drenante correctamente diseñado puede utilizarse para la mayor parte de las calles de uso residencial y muchas calles colectoras diseñadas para una vida en servicio típica de 20 a 30 años, siempre que tenga un mantenimiento estructural adecuado [43]. En base a estudios de infiltración Singh et al. [26] determinaron que, si se construye correctamente, un pavimento drenante funcionaría satisfactoriamente incluso después de 12 años de operación, y la tasa de infiltración promedio registrada fue de 0,006 cm/s [26].

Algunas de las señales que muestran el crecimiento de la adopción de este material en el mundo pueden relacionarse con la aplicación típica en la construcción de capas de rodamiento en Japón y sus políticas actuales de acuerdo a las cuales todas las aceras serían reemplazadas por sistemas de pavimentos drenantes debido a su mayor seguridad y comodidad de conducción. Paralelamente, China lanzó en 2012 una iniciativa de alcance nacional denominada "Ciudad Esponja", en la que se integran

diversas tecnologías específicas de gestión del agua de lluvia con el objetivo de reducir la escorrentía de aguas pluviales en la fuente, para lo cual se han construido pavimentos drenantes en 2015 y 2016, en ciudades piloto seleccionadas [40].

Otro efecto beneficioso de la aplicación del hormigón drenante en pavimentos de diversos tipos consiste en la reducción del ruido de interacción entre neumáticos y pavimentos. En diversos trabajos se informan reducciones entre 3 dBA y 8 dBA, variando estos resultados de acuerdo a las velocidades de los vehículos involucrados y a la condición del pavimento (seco o mojado) [38,40]. En el caso de los edificios, los ruidos provenientes de ocupantes de edificios pueden resultar problemáticas, y en estas condiciones, la estructura abierta del hormigón drenante tiende a absorber y disipar el sonido en el material más que reflejarlo hacia otra habitación [9].

Cuando se proponen obras destinadas a reducir los caudales pico, involucrando al hormigón drenante, también se mejora la calidad del agua antes de que alcance los cursos de agua receptores. Estos hormigones permiten reducir los nutrientes y elementos tóxicos en el agua de lluvia ya que si a estos contaminantes no se los atrapa contaminarán el sistema de drenaje y el agua subterránea [39].

Los mecanismos a través de los cuales es posible depurar las aguas pluviales infiltradas se pueden clasificar en tres categorías: la purificación física (adsorción de los materiales suspendidos en la estructura interna porosa y sinuosa del hormigón drenante); la depuración química (que implica un incremento del pH del agua residual y la liberación de iones hidróxido (OH^-) e iones carbonato (CO_3^{2-}) que reaccionan con los contaminantes y los precipitan, dada la naturaleza alcalina del material) y la depuración biológica (desarrollo de actividades microbianas que consumen materiales suspendidos y su disolución en la estructura interna porosa y sinuosa del hormigón drenante) [25].

Estudios realizados por distintos investigadores muestran que los pavimentos de hormigón drenante en áreas industriales permiten reducir la concentración de metales pesados en el agua de escorrentía. Asimismo, el efecto de purificación química del hormigón drenante fue investigado utilizando aguas residuales con coliformes fecales y fósforo, mostrando que el aumento de iones de hidróxido, aumentaba la eliminación de estos contaminantes [25,40,44-46]. Los pavimentos de hormigón drenante que contienen fotocatalizadores (como TiO_2 , ZnO , etc.) tienen el potencial de eliminar los compuestos contaminantes del agua y ayudar a frenar la contaminación en las áreas urbanas y, en este sentido, el hormigón drenante es un medio perfecto para la utilización de fotocatalizador debido a la gran superficie creada por los huecos (Fig. 6) [47].

Otras aplicaciones responden a la necesidad de estabilizar taludes. Uno de los métodos más efectivos radica en incrementar la resistencia al corte del suelo reduciendo la presión de agua en poros, mediante drenes y túneles horizontales o mediante drenajes de trinchera. Tanto para drenes de trinchera superficiales como profundas, o en pilas secantes, el espacio excavado (una ranura o un pozo) se rellena con un material granular suelto o con hormigón poroso. El empleo de hormigón drenante, permite en todos los casos superar los problemas de estabilidad derivados de la utilización de material suelto (Fig. 7) [48].

En nuestro país, las primeras experiencias con hormigón se ubican en 1987, llevadas adelante en los laboratorios de la Universidad

Nacional de Buenos Aires, obteniendo hormigones sin finos con peso unitario de aproximadamente 1700 kg/m^3 , resistencia a compresión entre 3,5 MPa y 4,5 MPa y resistencia a flexión de 0,60 MPa a 0,82 MPa [49].

En 1998, Fernández Luco et al. [29] propusieron un método eficiente para evaluar la permeabilidad al agua del hormigón drenante y para el diseño de mezclas de estas características, desde el Laboratorio de Investigaciones y Ensayos del Instituto del Cemento Portland Argentino. A partir de estas metodologías, se desarrollaron mezclas con resistencia a compresión de entre 10 MPa y 27,5 MPa, resistencia a flexión de 2,2 MPa a 3,9 MPa, porosidad de 16 % a 24 % y permeabilidad entre 13 mm/s y 48 mm/s.

Posteriormente, en 2008 otros investigadores desarrollaron un hormigón drenante apto para su utilización en capas de rodadura de vías de comunicación, caminos secundarios o estructuras con menores exigencias, incorporando aditivos químicos y adiciones minerales con el objetivo de mejorar la resistencia de la interfase entre los agregados, manteniendo constantes los valores de permeabilidad. Los hormigones que desarrollaron resistencia a compresión de entre 14 MPa y 25,2 MPa, resistencia a flexión de 1,8 MPa a 3,9 MPa, porosidad de 8,3 % a 21,7 % y permeabilidad entre 1,8 mm/s y 5,5 mm/s (Fig. 8) [27].

Experiencias más cercanas en el tiempo se enfocaron en la evaluación de mezclas drenantes elaboradas con agregados disponibles en diferentes regiones de nuestro

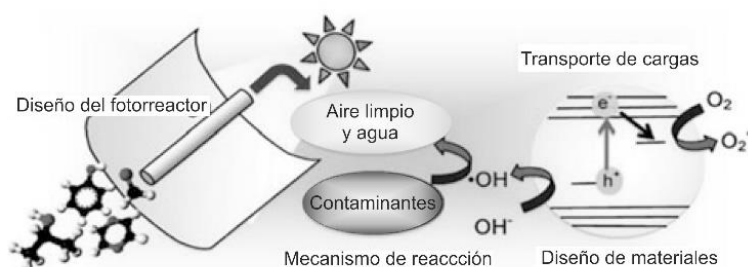


Figura 6. Esquema de interacción fotocatalítica [48].

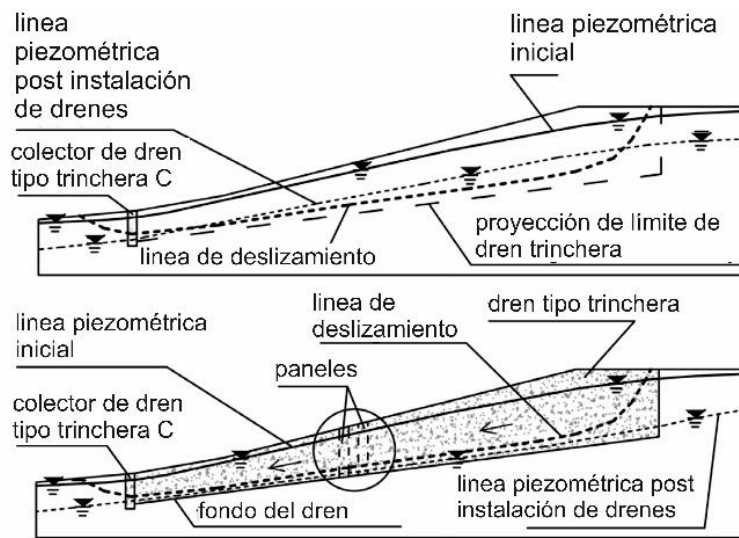


Figura 7. Drenes en los cuales puede emplearse hormigón drenante [49].



Figura 8. Aplicaciones de hormigones drenantes [27].

país que no responden estrictamente a las normativas y experiencias internacionales [50-52]. En algunas de estas experiencias se avanzó sobre el estudio de las tasas de infiltración de probetas limpias, comprendidas entre 7000 mm/h y 44.000 mm/h, y su variación en función del grado de colmatación, observando una drástica reducción hasta alcanzar la colmatación total con tasas comprendidas entre 20 mm/h y 45 mm/h [51].

6. Conclusiones

Recientemente, el hormigón drenante ha atraído un renovado interés entre los profesionales, contratistas y los ámbitos académicos debido a sus impactos ambientales positivos.

Dado que el hormigón drenante se emplea prioritariamente para el manejo de escorrentía

pluvial, la propiedad funcional característica de interés es la permeabilidad. En este sentido, los avances en el entendimiento de la estructura porosa y como ésta se ve influenciada por los parámetros del material y la dosificación, son avances muy significativos. Paralelamente, los progresos respecto de los métodos para evitar o reducir obstrucciones, así como aquellos referidos a la incidencia de los suelos circundantes, resultan fundamentales para potenciar los efectos beneficiosos de estas estructuras drenantes.

El hormigón drenante es mecánicamente más débil y el costo inicial es más alto en comparación con hormigones convencionales según estudios limitados. No obstante, estas consideraciones se basan únicamente en el costo de construcción inicial y no en el análisis de costos del ciclo de vida que indica que para el hormigón drenante puede

reducirse hasta en un 30%. Además, los beneficios adicionales que provienen de la gestión de las aguas pluviales y el bajo impacto ambiental deben tenerse en cuenta en lo que respecta a los costos y beneficios.

En la bibliografía internacional se destaca que existe la necesidad de desarrollar métodos de dosificación, procedimientos de diseño estructural, directivas para la puesta en obra y la realización del control de calidad. Se requiere más investigación respecto de los impactos del agua sobre la resistencia, sobre el efecto en los suelos subyacentes, del comportamiento de fatiga bajo cargas, así como potenciar resultados positivos de alivio del efecto de isla de calor.

El hormigón drenante es candidato prometedor para ser utilizado en diversos ámbitos de la construcción debido fundamentalmente a las contribuciones que implican la reducción de impactos ambientales habitualmente asociados a la urbanización. Su aplicación sigue siendo escasa en comparación con el hormigón convencional, especialmente en nuestro país, por lo que una difusión de los beneficios de su empleo acompañada de un mayor conocimiento de su tecnología puede contribuir a aplicaciones exitosas.

Referencias

- [1] Yang, J., y Jiang, G. (2003). Experimental study on properties of pervious concrete pavement materials. *Cem. Concr. Res.*, 33(3), 381–386. <https://doi.org/c56g35>
- [2] Ministerio de Planificación Federal, Inversión Pública y Servicios, Secretaría de Obras Públicas de la Nación (2005). INTI-CIRSOC. Reglamento argentino de estructuras de hormigón CIRSOC 201. (https://www.inti.gob.ar/assets/uploads/files/cirsoc/vigencia-2013/area100/area100a/reglamento201_completo.pdf).
- [3] Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (2013). *IRAM 1512. Agregado fino para hormigón de cemento. Requisitos*.
- [4] Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (2012). *IRAM 1531. Agregado grueso para hormigón de cemento. Requisitos*.
- [5] Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (1997). *IRAM 1627. Agregados. Granulometría de los agregados para hormigones*.
- [6] American Society for Testing and Materials. (2001). *ASTM D448 Standard Classification for Sizes of Aggregate for Road and Bridge Construction*.
- [7] American Society for Testing and Materials. (2001). *ASTM C33. Standard Specification for Concrete Aggregates*.
- [8] National Concrete Pavement Technology Center. (2006). *Mix design development for pervious concrete in cold weather climates* (2006-01), Center for Transportation Research and Education, Iowa State University. <https://www.perviouspavement.org/downloads/iowa.pdf>
- [9] American Concrete Institute. (2010). *522R-10: Report on Pervious Concrete*.
- [10] Nguyen, D. H., Sebaibi, N., Boutouil, M., Leleyter, L., y Baraud, F. (2014). A modified method for the design of pervious concrete mix. *Constr. Build. Mater.*, 73, 271–282. <https://doi.org/gxgc>
- [11] Crouch, L. K., Pitt, J., y Hewitt, R. (2007). Aggregate effects on pervious portland cement concrete static modulus of elasticity. *J. Mater. Civil Eng.*, 19(7), 561–568. <https://doi.org/bt4g54>
- [12] Kevern, J. T., Biddle, D., y Cao, Q. (2015). Effects of macrosynthetic fibers on pervious concrete properties. *J. Mater. Civil Eng.*, 27(9), 1–6. <https://doi.org/f7r7sg>
- [13] Magesvari, M. U., y Narasimha, V. L. (2013). Studies on characterization of pervious concrete for pavement applications. *Procedia - Soc. Behav. Sci.*, 104, 198–207. <https://doi.org/gxgg>
- [14] Rautenberg, D. P. (2017). *Estudio del Hormigón Permeable como Material de Construcción en Obras Viales - Contribución a la disminución del Impacto Ambiental asociado a la Urbanización* [Disertación de grado no publicada]. Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba.
- [15] Čosić, K., Korat, L., Ducman, V., y Netinger, I. (2015). Influence of aggregate type and size on properties of pervious concrete. *Constr. Build. Mater.*, 78, 69–76. <https://doi.org/gxgi>

- [16] Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (2000). *IRAM 50000. Cemento para uso general - Composición, características, evaluación de la conformidad y condiciones de recepción*.
- [17] Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (2000). *IRAM 50001. Cemento con propiedades especiales*.
- [18] American Society for Testing and Materials. (2001). *ASTM C150. Standard Specification for Portland Cement*.
- [19] American Society for Testing and Materials. (2001). *ASTM C595. Standard Specification for Blended Hydraulic Cements*.
- [20] American Society for Testing and Materials. (2001). *ASTM C1157. Standard Performance Specification for Hydraulic Cement*.
- [21] Lian, C., y Zhuge, Y. (2010). Optimum mix design of enhanced permeable concrete - An experimental investigation. *Constr. Build. Mater.*, 24(12), 2664–2671. <https://doi.org/bshw7t>
- [22] Khankhaje, E., Salim, M. R., Mirza, J., Hussin, M. W., Ho, C. S., y Rafieizonooz, M. (2017). Sustainable pervious concrete incorporating palm oil fuel ash as cement replacement. *Chem. Eng. Trans.*, 56, 445–450. <https://doi.org/10.3303/CET1756075>
- [23] National Ready Mixed Concrete Association (NRMCA). (2004). *Pervious in Practice (PIP)*. <https://www.nrmca.org/association-resources/research-and-engineering/pervious-in-practice-pip/>
- [24] Sonebi, M., Bassuoni, M., y Yahia, A. (2016). Pervious concrete: Mix design, properties and applications. *RILEM Tech. Lett.*, 1, 109–115. <https://doi.org/10.21809/rilemtechlett.2016.24>
- [25] Chandrappa, A. K., y Biligiri, K. P. (2016) Pervious concrete as a sustainable pavement material – Research findings and future prospects: A state-of-the-art review. *Constr. Build. Mater.*, 111, 262–274. <https://doi.org/gxgm>
- [26] Singh, A., Sampath, P. V. and Biligiri, K. P. (2020). A review of sustainable pervious concrete systems: Emphasis on clogging, material characterization, and environmental aspects. *Constr. Build. Mater.*, 261, 120491. <https://doi.org/gk9n2h>
- [27] Hernandez, C., Collura, A., y Mansilla, G. (2008). Hormigón poroso. En V. Rahhal, y J. Sota (Eds.), *II Congreso Internacional y 17ª Reunión Técnica AATH* (pp. 87–94). AATH.
- [28] Wu, H., Sun, B., Liu, Z., y Yin, J. (2017). Laboratory-simulated investigation on thermal behaviours of permeable concrete pavements. *Road Mater. Pavement Des.*, 18(sup3), 97–108. <https://doi.org/gxgn>
- [29] Fernández Luco, L., Vitola, L., y Salminci, P. N. (1998). Estado del arte en el uso de hormigones porosos. *Revista Carreteras*, XLIII(154), 50-60.
- [30] Torres, A., Hu, J., y Ramos, A. (2015). The effect of the cementitious paste thickness on the performance of pervious concrete. *Constr. Build. Mater.*, 95, 850–859. <https://doi.org/gxgp>
- [31] Castro, J., De Solminihaç, H., Videla, C. and Fernández, B. (2009). Estudio de dosificaciones en laboratorio para pavimentos porosos de hormigón. *Rev. Ing. Constr.*, 24(3), 271–284. <https://doi.org/dpsctd>
- [32] American Concrete Institute (2002). *ACI .211.3R. Guide for Selecting Proportions for No-Slump Concrete*.
- [33] de Solomihac, H., Videla, C., Fernández, B., y Castro, J. (2007). Desarrollo de mezclas de hormigón poroso para pavimentos urbanos permeables. *Mater. Constr.*, 57(287), 23–36. <https://doi.org/dkh6cv>
- [34] Federal Highway Administration (FHWA). (2012). *TechBrief Pervious Concrete (FHWA-HIF-13-006)*. United States Department of Transportation. <https://www.fhwa.dot.gov/pavement/concrete/pubs/hif13006/hif13006.pdf>
- [35] Olek, W., Weres, J., y Guzenda, R. (2003). Effects of thermal conductivity data on accuracy of modeling heat transfer in wood. *Holzforschung*, 57(3), 317–325. <https://doi.org/d2h2zs>
- [36] Aguado de Cea, A., Doiz Ripollés, J., y Rosell i Selvas, J.-J. (1986). Un material permeable y resistente - Aproximación al hormigón poroso. *Revista Carreteras*, 21, 29–40.
- [37] Singh, A., Sampath, P. V., y Biligiri, K. P. (2020). A review of sustainable pervious concrete systems: Emphasis on clogging, material characterization, and environmental aspects. *Constr. Build. Mater.*, 261, 120491. <https://doi.org/gk9n2h>
- [38] Barišić, I., Grubeša, I. N., y Barjaktarić, I. (2017). Pervious concrete for road intersection drainage. *World Acad. Sci. Eng. Technol. Int. J. Civil, Environ. Struct. Constr. Archit. Eng.*, 11(2), 89–94.

- [39] Jayasuriya, N., Kadurupokune, N., Othman, M., y Jesse, K. (2007). Managing stormwater productively using pervious pavements. En 6th International Conference on sustainable techniques and strategies for urban water management (NOVATECH) (pp. 1031–1038). GRAIE.
- [40] Zhong, R., Leng, Z., y Poon, C.-s. (2018). Research and application of pervious concrete as a sustainable pavement material: A state-of-the-art and state-of-the-practice review. *Constr. Build. Mater.*, 183, 544–553. <https://doi.org/gxgv>
- [41] Akbari, H., Fishman, B. L. y Frohnsdorff, G. (Eds.). (1994). *Proceedings of the Workshop on Cool Building Materials*. National Institute of Standards and Technology.
- [42] Andrade Perdrix, M. del C., Azorín López, V., Sánchez de Rojas Gómez, M. I., y Sorli Rojo, A. (Eds.). (2014). *Investigación en Construcción. El Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja del CSIC (1934-2014)*. Consejo Superior de Investigaciones Científicas.
- [43] Drews, A. (Ed.). (1998). *Manual on Hydrocarbon Analysis, 6th ed.* ASTM International.
- [44] Thives, L. P., Ghisi, E., Brecht, D. G., y Pires, D. M. (2017). Filtering capability of porous pavements. *Proceedings*, 2(5), 174. <https://doi.org/gxg5>
- [45] Javaheri-Tehrani, M., Mousavi, S.-F., Abedi-Koupai, J., y Karami, H. (2020). Treatment of domestic wastewater using the combination of porous concrete and phytoremediation for irrigation. *Paddy Water Environ.*, 18, 729–742. <https://doi.org/gxg7>
- [46] Faisal, G. H., Jaeel, A. J., y Al-Gasham, T. S. (2020). BOD and COD reduction using porous concrete pavements. *Case Stud Constr. Mater.*, 13, e00396. <https://doi.org/gxg8>
- [47] Hasan, M. R., Zain, M. F. M., Hamid, R., Kaish, A. B. M. A., y Nahar, S. (2017). A comprehensive study on sustainable photocatalytic pervious concrete for storm water pollution mitigation: A review. *Mater. Today Proc.*, 4(9), 9773–9776. <https://doi.org/gxg9>
- [48] Ziccarelli M., y Valore, C. (2019). Hydraulic conductivity and strength of pervious concrete for deep trench drains. *Geomech. Energy Environ.*, 18, 41–55. <https://doi.org/gxhc>
- [49] Gagliardi G. G. (1987). Estudio de propiedades físico-mecánicas de hormigones sin finos. En AATH (Ed.), *8ª Reunión Técnica de Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón* (pp. 323–342). AATH.
- [50] Sastre, M. I., Cardozo, H., Aramayo, N. B., y Noriega, J. D. (2016). Comportamiento de hormigones porosos con agregados pétreos de distintas cuencas de la provincia de Salta. En F. Irassar (Ed.), *VII Congreso Internacional y 21ª Reunión Técnica de la AATH* (pp. 98–103). AATH.
- [51] Garat, M. E., Palacio, A. J., Larenze, G. R., y Sota, J. D. (2019). Desempeño hidrológico y propiedades físico mecánicas de hormigones porosos elaborados con áridos de la provincia de Entre Ríos. *Rev. Tecnol. Cienc.*, 36, 81–104. <https://doi.org/gxhd>
- [52] Aguirre, D. D., Argento, R. S., y Carrasco, M. F. (2020). Hormigones Drenantes como Retardadores de Excedentes Pluviales. En M. C. Torrijos, y C. Zega (Eds.), *IX Congreso Internacional y 23ª Reunión Técnica de la AATH* (pp. 511-519). AATH.