



RECOMENDACIONES SOBRE PAVIMENTOS DE HORMIGÓN PERMEABLE

Agustín Spalvier, Alejandro Díaz, Ignacio Marrero, Tatiana Baliosian,
Ricardo Pielarisi y Luis Segura.

**Grupo de Hormigón Estructural, Instituto de Estructuras y Transporte,
Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Uruguay.**

Junio de 2021



(Página en blanco)

Prefacio

Esta guía se redactó como parte del convenio entre el *Grupo de Hormigón Estructural (GHE)* del *Instituto de Estructuras y Transporte (IET)* de la *Facultad de Ingeniería (FING)* de la *Universidad de la República (Udelar)* y el *Programa de las Naciones Unidas Para el Desarrollo (PNUD)*, en el marco del proyecto *NAPCiudades*.

Se buscó como objetivo redactar una guía práctica, destinada a actores del medio vinculados a la construcción o a la toma de decisión en esta temática (como empresas constructoras, hormigoneras y entidades estatales). La guía contempla el diseño, la elaboración, la construcción y el mantenimiento de hormigón permeable, teniendo en cuenta los materiales y procedimientos constructivos específicos de Uruguay.

La guía, que tomó como punto de partida el manual de la PCA (Tennis *et al.*, 2004), sintetiza recomendaciones científicas y técnicas, a nivel regional e internacional, e incorpora la experiencia local obtenida de distintos proyectos en este tema desarrollados por el Grupo de Hormigón Estructural desde 2018. En particular, la construcción del primer pavimento de hormigón permeable construido en Uruguay (con la colaboración de Hormigones Artigas y la constructora CIEMSA) en el marco de este mismo proyecto, y la tesis de grado de los estudiantes Tomás Herrera, Ignacio Marrero, Alejandro Díaz, defendida en 2020 (Díaz *et al.*, 2020).

Agradecimientos

DINAGUA: *Adriana Piperno, Juan Pablo Martínez, Cecilia Emanuelli.*

Hormigones Artigas: *Gustavo Tovar, Ariel Guzzo, Rodrigo Alés, Darío Miguez.*

CIEMSA: *Delfina Storace, Nicolás Mantiñán, Pablo González, Luis López, Ezequiel González, Juan Manuel Álvarez, Juan Álvarez.*

Facultad de Ingeniería: *Tomás Herrera, Jimena Alonso (IMFIA). Adrián Santos (Plan de Obras). Carlos "Beto" Gómez, Marcelo Gancio, Enzo González, Andrés Clavijo, Cinthia Planchon (IET).*

Revisión: *Guzman Rippe.*

Web

<https://hormigonpermeable.com/>

<p>Se ha hecho todo lo posible para garantizar la exactitud de la información presentada en este manual. Sin embargo, Udalar no puede aceptar responsabilidad por errores, descuidos o mal uso de la información contenida en este documento. El usuario debe reconocer que ningún manual o reglamento puede sustituir la experiencia y el buen juicio. Esta publicación está destinada al uso de personal competente para evaluar el significado y la limitación de la información que contiene, y aceptar la responsabilidad de su correcta interpretación y aplicación.</p>
--

(Página en blanco)

Índice de Contenidos

1. INTRODUCCIÓN	7
2. PROPIEDADES.....	11
2.1. GENERAL.....	11
2.2. PROPIEDADES EN ESTADO FRESCO	11
2.3. PROPIEDADES EN ESTADO ENDURECIDO	11
2.3.1. <i>Densidad, porosidad y porosidad efectiva</i>	<i>12</i>
2.3.2. <i>Permeabilidad</i>	<i>12</i>
2.3.3. <i>Resistencia a la compresión.</i>	<i>13</i>
2.3.4. <i>Resistencia a la flexión</i>	<i>15</i>
2.3.5. <i>Retracción por secado (Shrinkage).....</i>	<i>16</i>
2.4. DURABILIDAD.....	17
2.4.1. <i>Resistencia a la abrasión</i>	<i>17</i>
2.4.2. <i>Resistencia a los sulfatos.....</i>	<i>17</i>
3. DOSIFICACIÓN (DISEÑO DE LA MEZCLA)	19
3.1. MATERIALES	19
3.2. CEMENTO.....	19
3.3. AGREGADOS	20
3.4. AGUA	20
3.5. ADITIVOS.....	22
3.6. MEZCLA DE PRUEBA.....	22
4. DISEÑO HIDROLÓGICO Y ESTRUCTURAL	23
4.1. BASES PARA EL DISEÑO	23
4.2. CONSIDERACIONES DEL DISEÑO HIDROLÓGICO.....	23
4.2.1. <i>Diseño hidrológico del pavimento</i>	<i>24</i>
4.2.2. <i>Permeabilidad</i>	<i>24</i>
4.2.3. <i>Capacidad de almacenamiento</i>	<i>24</i>
4.2.4. <i>Subrasante</i>	<i>25</i>
4.3. CONSIDERACIONES DEL DISEÑO ESTRUCTURAL.....	26
4.3.1. <i>Diseño Estructural del Pavimento</i>	<i>26</i>
4.3.2. <i>Suelos de base y Subrasante</i>	<i>26</i>
4.3.3. <i>Arcillas y Suelos Altamente Expansivos.....</i>	<i>27</i>
4.3.4. <i>Cargas de tráfico</i>	<i>27</i>
4.3.5. <i>Propiedades Materiales Relacionadas al Diseño de Pavimentos</i>	<i>28</i>
5. CONSTRUCCIÓN.....	29
5.1. COMENTARIOS GENERALES	29
5.2. PREPARACIÓN DEL LUGAR	29
5.3. MEZCLADO, TRANSPORTE Y DESCARGA.	29
5.4. CONTROL DE RECEPCIÓN EN ESTADO FRESCO	31
5.5. COLOCACIÓN	33
5.6. COMPACTACIÓN Y TERMINACIÓN	34
5.7. INSTALACIÓN DE JUNTAS.....	35
5.8. CURADO.....	36
5.9. PAÑO DE PRUEBA.....	37
6. CONTROL EN ESTADO ENDURECIDO Y MANTENIMIENTO	39
6.1. INSPECCIÓN Y ENSAYOS DURANTE LA CONSTRUCCIÓN	39
6.2. INSPECCIÓN Y ENSAYOS LUEGO DE LA CONSTRUCCIÓN	39
6.3. MANTENIMIENTO	40
7. REFERENCIAS.....	41

Índice de Figuras

FIGURA 1. ASPECTO DEL HORMIGÓN PERMEABLE EN PROBETA CILÍNDRICA.	7
FIGURA 2. LOSETA DEMOSTRATIVA DE HORMIGÓN PERMEABLE FILTRANDO AGUA.....	7
FIGURA 3. ESTACIONAMIENTO DE HORMIGÓN PERMEABLE EN ESTADOS UNIDOS. (IMAGEN EXTRAÍDA DE WWW.PERVIOUSPAVEMENT.ORG / SIN COPYRIGHT)	8
FIGURA 4. SENDA PEATONAL DE HORMIGÓN PERMEABLE EN ST. ALBANS, VERMONT, ESTADOS UNIDOS. (IMAGEN CORTESÍA DE: NORTHWEST REGIONAL PLANNING COMMISSION, ST ALBANS, VERMONT)	8
FIGURA 5. PLAZA DE HORMIGÓN PERMEABLE EN BEIJING, CHINA. (IMAGEN CORTESÍA DE: WWW.CONCRETEDECOR.NET).....	9
FIGURA 6. BICISENDA DE HORMIGÓN PERMEABLE EN CALIFORNIA, ESTADOS UNIDOS. (IMAGEN CORTESÍA DE: WWW.BAYAREAPERVIOUSCONCRETE.COM).....	9
FIGURA 7. UTILIZACIÓN DE HORMIGÓN PERMEABLE A LOS LATERALES DE UNA CALLE EN REGO PARK, QUEENS, NUEVA YORK, ESTADOS UNIDOS. (IMAGEN EXTRAÍDA DE WWW.NYCSTREETDESIGN.INFO / SIN COPYRIGHT).....	10
FIGURA 8. APARIENCIA DEL HORMIGÓN PERMEABLE EN ESTADO FRESCO.....	11
FIGURA 9. VALORES TÍPICOS DE PERMEABILIDAD, RESISTENCIA A COMPRESIÓN Y RESISTENCIA A FLEXIÓN EN FUNCIÓN DEL CONTENIDO DE VACÍOS PARA EL HORMIGÓN PERMEABLE.....	13
FIGURA 10. PERMEÁMETRO DE CARGA VARIABLE.....	14
FIGURA 11. ESQUEMA E IMAGEN DEL PERMEÁMETRO DE CARGA CONSTANTE.....	14
FIGURA 12. PROBETA CILÍNDRICA EN ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN.....	15
FIGURA 13. ESQUEMA DEL ENSAYO DE FLEXIÓN A CUATRO PUNTOS.....	16
FIGURA 14. SUPERFICIE TERMINADA DE HORMIGÓN PERMEABLE.....	17
FIGURA 15. PROBETAS (Φ10 CM X 20 CM) DE HORMIGÓN PERMEABLE CON PIEDRA PARTIDA (TMA: 14 MM) Y GRAVILLÍN (TMA: 10 MM) COMO AGREGADO GRUESO.....	20
FIGURA 16. MEZCLA DE HORMIGÓN PERMEABLE CON CANTIDAD ADECUADA DE AGUA.....	21
FIGURA 17. MEZCLA DE HORMIGÓN PERMEABLE CON CANTIDAD INSUFICIENTE DE AGUA.....	21
FIGURA 18. MEZCLA DE HORMIGÓN PERMEABLE CON CANTIDAD EXCESIVA DE AGUA.....	22
FIGURA 19. SECCIÓN TRANSVERSAL TÍPICA DE SISTEMA DE HORMIGÓN PERMEABLE.....	25
FIGURA 20. SECUENCIA GENERAL DE CONSTRUCCIÓN DE PAVIMENTOS DE HORMIGÓN PERMEABLE.....	30
FIGURA 21. PREPARACIÓN DEL TERRENO PREVIO A LA COLOCACIÓN DEL HORMIGÓN PERMEABLE.....	31
FIGURA 22. DESCARGA DE HORMIGÓN PERMEABLE DESDE MIXER.....	31
FIGURA 23. EJEMPLO DE HORMIGÓN PERMEABLE CON APARIENCIA VISUAL ADECUADA.....	32
FIGURA 24. ENSAYO DEL CONO DE ABRAMS EN HORMIGÓN PERMEABLE (NO RECOMENDABLE COMO CONTROL DE RECEPCIÓN), Y ENSAYO DE DENSIDAD EN ESTADO FRESCO (ENSAYO RECOMENDADO).....	32
FIGURA 25. EJEMPLO DE COLOCACIÓN Y NIVELACIÓN CON REGLA MANUAL.....	33
FIGURA 26. NIVELACIÓN CON SOBREALTURA Y ASPECTO PREVIO A LA COMPACTACIÓN LUEGO DE RETIRAR LISTÓN.....	33
FIGURA 27. EJEMPLO DE COMPACTACIÓN MEDIANTE “RODILLO PESADO” E IMAGEN DEL RODILLO.....	34
FIGURA 28. EJEMPLO DE REPARACIÓN Y COMPACTACIÓN LOCAL MEDIANTE PISÓN Y RODILLO MANUAL.....	34
FIGURA 29. RODILLO “CORTA-PIZZA” PARA REALIZACIÓN DE JUNTAS.....	35
FIGURA 30. INSTALACIÓN DE JUNTAS MEDIANTE PERFIL TE.....	36
FIGURA 31. CURADO DE HORMIGÓN PERMEABLE UTILIZANDO LÁMINA PLÁSTICA.....	37
FIGURA 32. ENSAYO DE TASA DE INFILTRACIÓN SEGÚN ASTM C1701.....	40

Índice de Tablas

TABLA 1. RANGOS TÍPICOS DE PROPORCIÓN DE MATERIALES EN HORMIGÓN PERMEABLE (EN BASE A ACI 522R-10).....	19
TABLA 2. RANGOS APROXIMADOS DE K_w Y TIPOS DE BASES (TENNIS ET AL., 2004).....	27

1. INTRODUCCIÓN

El hormigón permeable es un hormigón especial que se caracteriza por permitir el pasaje del agua debido al porcentaje de poros interconectados que posee. Constituye un material de alta cohesión y porosidad, conformado por cemento portland, agregado grueso, poco o nulo agregado fino, aditivos y agua. La combinación de estos ingredientes produce un material rígido con poros interconectados el cual permite el pasaje de agua. En la Figura 1 se puede ver el aspecto del hormigón permeable en un plano cercano, y en la En la Figura 2 se puede ver una loseta demostrativa de hormigón permeable filtrando agua.



Figura 1. Aspecto del hormigón permeable en probeta cilíndrica.



Figura 2. Loseta demostrativa de hormigón permeable filtrando agua.



Figura 3. Estacionamiento de hormigón permeable en Estados Unidos. (Imagen extraída de www.perviouspavement.org / Sin copyright)



Figura 4. Senda peatonal de hormigón permeable en St. Albans, Vermont, Estados Unidos. (Imagen cortesía de: Northwest Regional Planning Commission, St Albans, Vermont)

La capacidad de infiltración de agua del hormigón permeable es particularmente beneficiosa en varias tipologías constructivas, como por ejemplo en estacionamientos, caminos de bajo volumen de tránsito, sendas peatonales, bicisendas, explanadas, peatonales y plazas, particularmente en zonas susceptibles a inundaciones (ACI Committee 522, 2010). También puede ser empleado como superficie de drenaje rígido en diferentes tipos de superficies, como puede ser en cordones cuneta y badenes o zonas donde sea conveniente no tener pendientes. Las Figura 3 a Figura 7 muestran algunos ejemplos de aplicación del hormigón permeable.



Figura 5. Plaza de hormigón permeable en Beijing, China. (Imagen cortesía de: www.concretedecor.net)



Figura 6. Bicisenda de hormigón permeable en California, Estados Unidos. (Imagen cortesía de: www.bayareaperviousconcrete.com)

Si bien el hormigón permeable no constituye una tecnología nueva, sí existe un interés renovado debido a nuevas tendencias para la construcción de estructuras ambientalmente amigables. La gran capacidad de infiltración de pavimentos de hormigón permeable permite el pasaje de aguas pluviales hacia el suelo, reduciendo así la cantidad de agua en sistemas de desagüe y recargando aguas subterráneas. Esta capacidad del material para tratar con las aguas pluviales ofrece una ventaja única para entes estatales, propietarios de edificios y al entorno propiamente dicho, particularmente en zonas urbanas donde los terrenos verdes no abundan. Dependiendo de las regulaciones locales y del entorno, la instalación de un pavimento de hormigón permeable puede proveer suficiente capacidad de almacenaje de agua para evitar la implementación de elementos de retención de aguas pluviales como lagunas y zanjas de retención.



Figura 7. Utilización de hormigón permeable a los laterales de una calle en Rego Park, Queens, Nueva York, Estados Unidos. (Imagen extraída de www.nycstreetdesign.info / Sin copyright)

La elevada porosidad del material también ofrece otras características interesantes como la capacidad de aislación acústica y térmica. Su uso puede extenderse a lugares como centros de grandes ciudades, donde la contaminación sonora en el tránsito es actualmente un tema central para la gestión ambiental (Chu, L., Fwa, T. F., & Tan, K. H., 2017).

2. PROPIEDADES

2.1. General

Las diferentes propiedades del hormigón permeable dependen principalmente de su porosidad (contenido de vacíos), el cual a su vez depende de la relación pasta/agregado, del contenido de cemento, de la relación agua/cemento (a/c), del nivel de compactación, y de la calidad y graduación (granulometría) del agregado utilizado. El tamaño de los poros utilizados también afecta las propiedades del material.

2.2. Propiedades en estado fresco

La trabajabilidad de la mezcla en el hormigón permeable es menor en comparación con la del hormigón convencional. Los asentamientos medidos son generalmente menores a 2 cm, aunque se han utilizado hormigones permeables con asentamientos de hasta 5 cm. Es por esto que no es recomendable utilizar el ensayo del cono de Abrams como control de este material.

Cuando el hormigón permeable se coloca y compacta, los agregados se adhieren fuertemente unos con otros a través de la pasta de cemento, presentando el sistema de poros interconectados característico. En la Figura 8 se muestra un puñado de hormigón permeable en estado fresco.



Figura 8. Apariencia del hormigón permeable en estado fresco.

El tiempo trabajable del hormigón permeable es limitado. Usualmente se recomienda que no se sobrepase de una hora entre mezclado y colocación. Sin embargo, esto puede controlarse utilizando retardadores y estabilizadores de hidratación, lo que podría extender el tiempo trabajable a aproximadamente una hora y media.

2.3. Propiedades en estado endurecido

La permeabilidad es la propiedad fundamental que caracteriza al hormigón permeable y lo diferencia de otros que suelen utilizarse para estructuras viales. Es evidente que a medida que aumenta el contenido de vacíos en la mezcla, también aumenta su permeabilidad. Sin embargo, a mayor contenido de vacíos menor es la resistencia del material. El desafío al realizar dosificaciones de hormigón permeable radica en alcanzar

un equilibrio entre la resistencia y la permeabilidad que satisfaga los requerimientos del proyecto en cuestión.

En la Figura 9 se representan valores usuales de permeabilidad y resistencias en función de la porosidad. Los valores obtenidos pueden variar para cada mezcla y condición de trabajo particular, por lo que estos valores deben tomarse solamente como orientativos. En las gráficas también se indica el rango típico de trabajo en el que suelen ubicarse las dosificaciones de hormigón permeable.

Varios estudios han mostrado que para obtener una permeabilidad significativa se requiere como mínimo un 15 % de porosidad (Meininger, 1988). Por su parte, un contenido de vacíos mayor al 25 % no es recomendable debido a que se asocia a valores de resistencia bajos para exigencias mecánicas usuales en pavimentos. A continuación, se describen las propiedades más importantes de este material.

2.3.1. Densidad, porosidad y porosidad efectiva

La densidad del hormigón permeable en su estado endurecido depende de las propiedades y proporciones de los materiales componentes, y de la metodología de compactación utilizada. Las densidades obtenidas en sitio comúnmente se encuentran en el orden de 1600 kg/m^3 a 2000 kg/m^3 , el cual es equivalente con el rango superior de un hormigón liviano.

Como se dijo anteriormente, las principales propiedades del hormigón permeable están fuertemente influenciadas por su porosidad. Es posible evaluar tanto la porosidad como la densidad mediante la norma ASTM C1754.

Para determinar la capacidad de almacenamiento de agua en el hormigón permeable, es necesario evaluar los poros interconectados. Esta propiedad se denomina “porosidad efectiva”. No hay una norma aceptada para su evaluación, pero se han propuesto algunas metodologías, como por ejemplo en (Neithalath 2004).

2.3.2. Permeabilidad

La permeabilidad está directamente relacionada con la porosidad del material, y con el tamaño y conectividad de los poros que posee. En la Figura 9 se presenta esquemáticamente la relación entre la permeabilidad en el hormigón permeable y el contenido de vacíos (porosidad). Para una porosidad de entre 20 y 25% se obtienen coeficientes de permeabilidad de aproximadamente 1.0 cm/s (Brite/Euram Report, 1994).

El ensayo de permeabilidad consiste en generar una circulación de agua a través de una probeta cilíndrica de hormigón permeable, durante un tiempo determinado, y medir el volumen de agua pasante. Con este volumen y algunos parámetros geométricos del dispositivo de la prueba, se puede calcular un “coeficientes de permeabilidad”, que caracterizan la permeabilidad del material. Este coeficiente permite comparar la permeabilidad entre diferentes mezclas del material. Coeficientes de permeabilidad típicos van de 0.2 cm/s ($120 \text{ L/m}^2/\text{min}$) hasta 0.5 cm/s ($300 \text{ L/m}^2/\text{min}$), con valores de hasta 1.2 cm/s ($720 \text{ L/m}^2/\text{min}$), aunque se han medido valores superiores en laboratorio (Tennis *et al.*, 2004).

A pesar de que existen diversos dispositivos con diferentes configuraciones para cuantificar la permeabilidad del hormigón permeable, aun no existe una norma estandarizada ampliamente aceptada. Esto dificulta la comparación de distintas mezclas, ya que se obtienen diferencias al evaluar esta propiedad con dispositivos distintos.

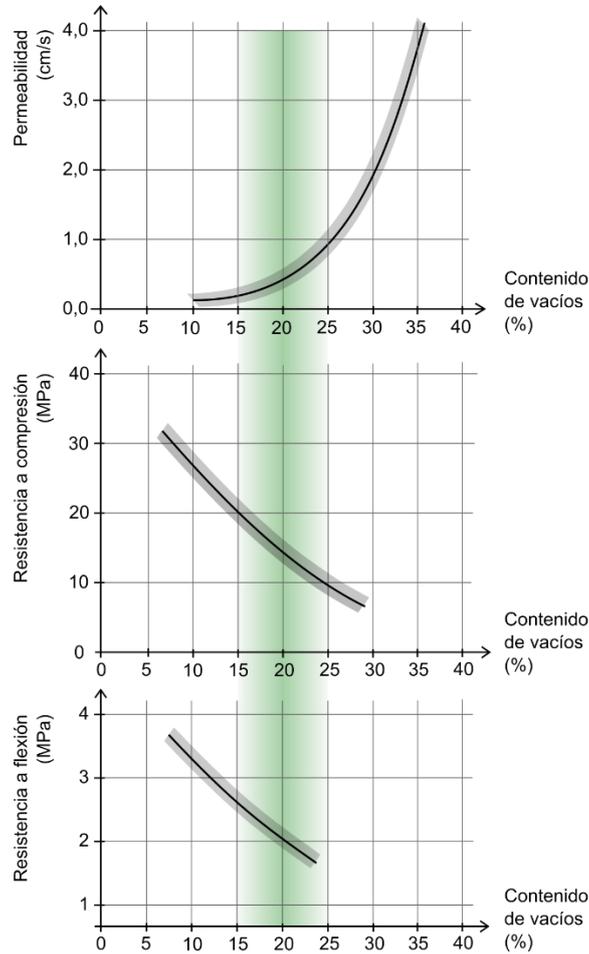


Figura 9. Valores típicos de permeabilidad, resistencia a compresión y resistencia a flexión en función del contenido de vacíos para el hormigón permeable.

En los primeros desarrollos se utilizaron permeámetros de “carga variable” (ver Figura 10), posiblemente debido a su más simple elaboración y forma de ejecución. Más recientemente, al comprobar que la variabilidad y subjetividad de este dispositivo era elevada, se registra una tendencia a utilizar los permeámetros de “carga constante”, con los cuales se obtienen resultados más robustos. En la Figura 11 se presenta un esquema del dispositivo, y una foto de una variante de éste, usada en investigación, en la cual se pueden evaluar distintos niveles de carga, y en el que se utiliza una bomba para recircular el agua que desborda del rebalse superior.

2.3.3. Resistencia a la compresión.

La resistencia a la compresión depende fuertemente de la dosificación utilizada y de la compactación aplicada (y consecuentemente del contenido de vacíos de la mezcla). En la Figura 9 se expone de forma cualitativa la relación entre la resistencia y el contenido de vacíos.

A pesar de que la relación a/c es importante para el desarrollo de la resistencia del material, en el hormigón permeable la influencia de la relación a/c en la resistencia a compresión no sigue las mismas reglas que en un hormigón convencional. Una relación a/c alta puede resultar en una pasta muy líquida que fluye a través de los agregados y llena los poros del material. Una relación a/c baja puede resultar en una baja cohesión entre los agregados, generando bajas resistencias y problemas para la colocación del material. Por esto, es fundamental controlar el contenido de agua utilizado en la mezcla de hormigón permeable, aún más que en el hormigón convencional. Con relaciones a/c de entre 0.26 y 0.45 se han logrado mezclas con una buena estabilidad y cobertura de pasta en los agregados.

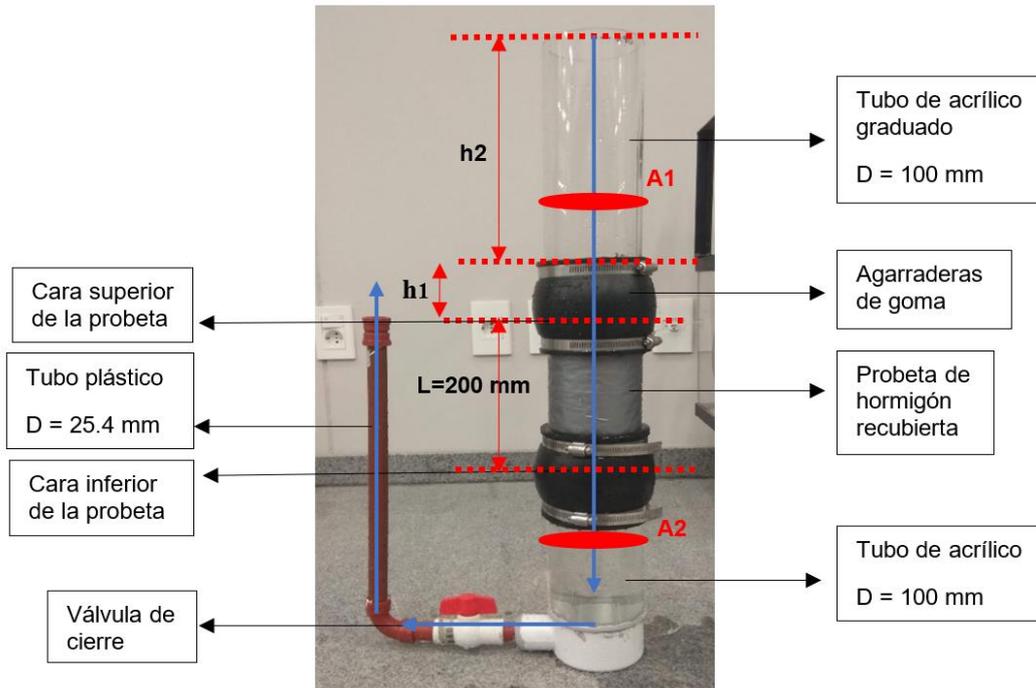


Figura 10. Permeámetro de carga variable.

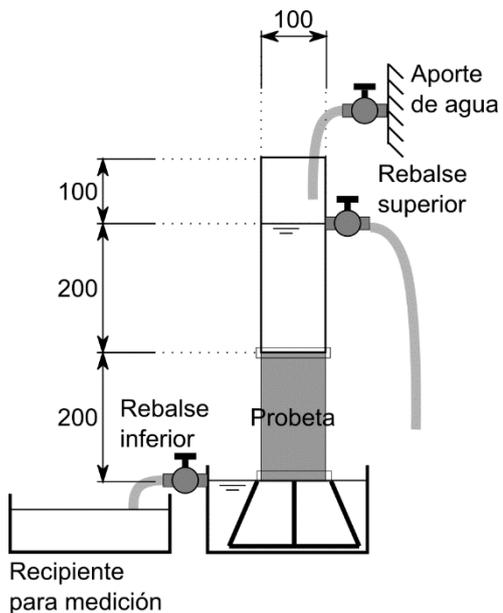


Figura 11. Esquema e imagen del permeámetro de carga constante.

No existe aún un método estandarizado para medir la resistencia a la compresión específico para el hormigón permeable. Usualmente se ensayan probetas cilíndricas en prensas, en forma análoga al ensayo de compresión de hormigón convencional, tal como se puede ver en la Figura 12. Un aspecto importante para resaltar es que las mezclas de hormigón permeable pueden desarrollar resistencias a la compresión en un amplio rango, de 3.5 MPa a 30 MPa, los cuales pueden ser adecuados para una amplia variedad de aplicaciones. Los valores típicos se encuentran en el entorno de 17 MPa. Como en todos los hormigones, las propiedades y combinaciones de materiales específicos, tanto como las técnicas de colocación y condiciones ambientales, influyen en la resistencia final que se tendrá en sitio.

Resulta muy difícil simular en laboratorio las condiciones de compactación que se logran en la práctica al ejecutar un pavimento de hormigón permeable. Este aspecto adquiere particular importancia debido a la fuerte dependencia que existe entre la resistencia a la compresión y la compactación aplicada. Por lo tanto, para obtener valores más representativos de la resistencia *in situ* es recomendable ensayar testigos extraídos del pavimento. Por otro lado, dependiendo de las propiedades del material, el proceso de extracción puede generar un daño considerable en las caras de corte del testigo a extraer.



Figura 12. Probeta cilíndrica en ensayo de resistencia a la compresión.

2.3.4. Resistencia a la flexión

Los valores de resistencia a la flexión suelen estar en el rango de 1 MPa a 4 MPa. Entre los factores que influyen en la resistencia a la flexión, el grado de compactación, la porosidad y la relación agregado/cemento son quienes tienen una mayor incidencia. La Figura 9 muestra un gráfico que relaciona cualitativamente la porosidad con la resistencia a flexión.

Para medir la resistencia a la flexión del material se utilizan probetas prismáticas ensayadas a flexión. Uno de los ensayos utilizados es el ensayo de flexión a cuatro puntos (ASTM C78, 2010). En la Figura 13 se presenta un esquema del ensayo.

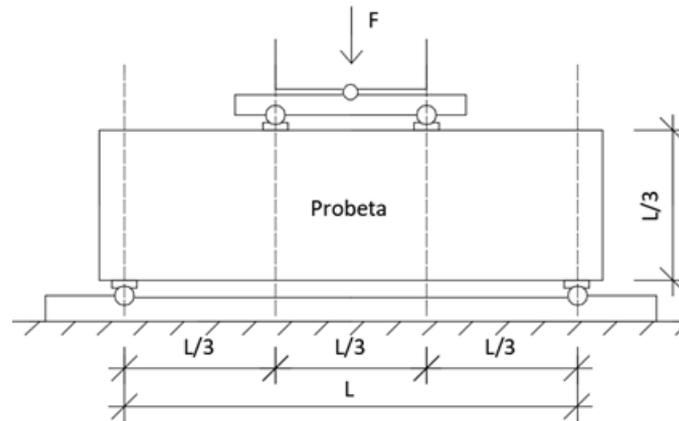


Figura 13. Esquema del ensayo de flexión a cuatro puntos.

Estudios experimentales han verificado que la resistencia a tracción por flexión aumenta a medida que aumenta la resistencia a compresión. A su vez, la norma estadounidense ACI 522 indica que la relación entre estas propiedades para el hormigón permeable se adapta de forma aceptable a la existente para el hormigón convencional. Por lo tanto, puede estimarse la resistencia a tracción por flexión del material a partir de su resistencia a la compresión, como

$$f_r = 0.4377 f_c^{2/3} \quad (1)$$

siendo f_c' la resistencia a compresión del hormigón y f_r la resistencia a flexión por tracción, en MPa.

2.3.5. Retracción por secado (Shrinkage)

En comparación con el hormigón convencional, la retracción por secado del hormigón permeable se desarrolla a menores edades, pero su valor total es menor. Al igual que las demás propiedades, los valores específicos de la retracción dependen de la mezcla y los materiales utilizados. Valores convencionales reportados se encuentran en el orden de 200×10^{-6} (Malhotra 1976), es decir, aproximadamente la mitad de la retracción de mezclas de hormigón convencional. El bajo contenido de pasta y mortero en el material es una posible explicación.

En cuanto al tiempo en que se desarrolla, aproximadamente el 50 % a 80 % de la retracción ocurre en los primeros 10 días. Esto contrasta con un 20 % a 30 % de retracción del hormigón convencional en el mismo período de tiempo. Gracias a esta baja retracción y la textura en la superficie, se considera posible realizar pavimentos de hormigón permeable sin juntas de contracción, en cuyo caso se permite que el hormigón fisure al azar sin generar complicaciones de servicio.

2.4. Durabilidad

2.4.1. Resistencia a la abrasión

La mayor rugosidad de su superficie, y su estructura abierta, hacen que la abrasión y el desprendimiento de partículas de agregados pueda ser un problema en pavimentos de hormigón permeable. La mayoría de estos pavimentos tendrán algunos agregados sueltos en su superficie las primeras semanas después de su apertura al tráfico. Estos agregados inicialmente se encuentran levemente sujetos a la superficie y se desprenden debido a la carga del tráfico. Pasadas las primeras semanas, la tasa de desprendimiento de la superficie disminuye considerablemente y la superficie del pavimento se vuelve más estable. Las técnicas de compactación y curado adecuadas reducen la aparición de estos desprendimientos. En la Figura 14 se muestra el aspecto y terminación de la superficie del hormigón permeable en estado endurecido.



Figura 14. Superficie terminada de hormigón permeable.

2.4.2. Resistencia a los sulfatos.

Químicos agresivos en el suelo o el agua, tales como ácidos y sulfatos, son una preocupación tanto en los hormigones convencionales como en hormigones permeables. Sin embargo, la estructura abierta del hormigón permeable lo hace más susceptible al ataque por su mayor área expuesta. El hormigón permeable puede ser utilizado en áreas de suelos y aguas subterráneas con alto contenido de sulfatos si se aísla del mismo. El correcto aislamiento del hormigón permeable frente al ataque químico se genera con una capa de por lo menos 150 mm de agregado, con un tamaño máximo de 25 mm, que a su vez proporciona una base de sustentación al pavimento y permite el almacenamiento de aguas pluviales. A menos que se tomen estas precauciones, en ambientes agresivos debe seguirse estrictamente las recomendaciones de ACI Committee 201 sobre relación agua/cemento, tipos y proporciones de materiales.

(Página en blanco)

3. DOSIFICACIÓN (DISEÑO DE LA MEZCLA)

3.1. Materiales

El hormigón permeable utiliza los mismos materiales que el hormigón convencional, con la particularidad de que el agregado fino generalmente es eliminado de la mezcla. Además, la granulometría utilizada para el agregado grueso debe ser pobremente graduada (con poca variación en el tamaño de las partículas). De esta manera se evita la típica agrupación o encastre de agregados bien graduados, logrando un sistema de poros interconectados que permite el pasaje de agua. Esto resulta en un material con características beneficiosas en estado endurecido, pero el cual también requiere consideraciones constructivas diferentes en las etapas de mezclado, colocación, compactación y curado.

En la Tabla 1 se muestran, a título informativo, rangos típicos de proporción de materiales para hormigón permeable. Es recomendable que los productores locales determinen, en base a la bibliografía, a ensayos y a la experiencia acumulada, las proporciones ideales para los materiales locales disponibles. Como referencia, la ACI 522R-10 propone un procedimiento para el diseño de mezclas de hormigón permeable.

Tabla 1. Rangos típicos de proporción de materiales en Hormigón Permeable (en base a ACI 522R-10).

Componente o relación	Proporciones
Cemento (kg/m ³)	250 a 400
Agregado (kg/m ³)	1200 a 1500
Relación agua/cemento (a/c) (en masa)	0.27 a 0.34
Ratio agregado grueso / cemento (en masa)	(4 a 4.5) / 1
Ratio agregado grueso / fino (en masa)	(0 a 0.1) / 1

Es recomendable realizar testeos previos del material mediante lotes de prueba. De esta manera se determinan las propiedades de importancia para el desempeño del material, como el tiempo de fraguado, velocidad de ganancia de resistencia, porosidad y permeabilidad, entre otras.

Las tolerancias de las cantidades de materiales en la dosificación son menores que en el hormigón convencional. Por ello, para alcanzar los resultados proyectados deseados, son necesarios controles estrictos en la cantidad y la calidad de los materiales componentes.

3.2. Cemento

Al igual que en el hormigón convencional, cementos portland y cementos mixtos pueden ser utilizados en hormigón permeable. Adicionalmente, materiales cementicios suplementarios como cenizas volantes y puzolanas, y escoria granulada de alto horno pueden ser utilizadas.

3.3. Agregados

La capacidad de filtrar agua en el hormigón se logra a partir de la poca o nula presencia de agregados finos en su composición, buscando conformar un sistema de poros interconectados que permita el flujo de agua. A nivel mundial es común la utilización de piedra partida o de canto rodado, aunque se suelen alcanzar mayores valores de resistencia utilizando este último (Tennis, *et al.*, 2004).

Se recomienda utilizar granulometrías de poca variación, con tamaños de agregados que varíen entre 5 y 19 mm. Los usos recientes para el hormigón permeable se han enfocado en estacionamientos, pavimentos para tráfico liviano, y sendas peatonales. Por razones estéticas se utilizan agregados gruesos más pequeños, ya que tamaños más grandes implicarían superficies demasiado rugosas que son poco deseables para estas aplicaciones. En la Figura 15 se muestran ejemplos de dos granulometrías diferentes utilizadas en probetas de hormigón permeable, una con tamaño máximo de árido (TMA) de 14 mm, y otra con TMA de 10 mm.



Figura 15. Probetas ($\phi 10$ cm x 20 cm) de hormigón permeable con piedra partida (TMA: 14 mm) y gravillín (TMA: 10 mm) como agregado grueso.

3.4. Agua

El contenido ideal de agua ha sido descrito como aquel que le proporciona a la mezcla un aspecto brillante, pero sin desmoronamiento del agregado. Idealmente, un puñado de hormigón permeable en estado fresco formará una “pelota” que no se desmorona y mantiene su aspecto poroso (ver Figura 16). Relaciones agua/cemento (a/c) de entre 0.26 a 0.45 han sido utilizadas con inclusiones adecuadas de aditivos.

Como se indicó previamente (apartado 2.3.3), a diferencia del hormigón convencional, la correlación entre resistencia y relación agua/cemento (a/c) no es tan clara en el hormigón permeable, e incluso, pequeñas variaciones en la relación agua/cemento de la dosificación

pueden conducir a grandes variaciones en las propiedades del material, haciéndolo poco apto para su uso requerido (Neamitha & Supraja, 2017).

A diferencia del hormigón convencional, el contenido total de pasta es menor que el contenido de vacíos entre los agregados, por lo que, hacer la pasta más resistente (reduciendo la relación a/c) no siempre conlleva a un incremento en la resistencia del hormigón permeable. Una relación a/c baja (ver Figura 17) puede resultar en una pasta seca con problemas de mezclado y baja cohesividad entre los agregados, generando bajas resistencias y problemas para lograr una colocación y compactación adecuada del material.

Una relación a/c alta puede resultar en una pasta muy líquida, que brinda poca cohesión a la mezcla (ver Figura 18), con el riesgo que fluya a través de los agregados durante la colocación y compactación, llenando los poros en la zona inferior del elemento y disminuyendo la resistencia de la zona superior.

Por esto, es fundamental controlar estrictamente el contenido de agua utilizado en la mezcla de hormigón permeable, aún más que en el hormigón convencional. Es importante, a su vez, conocer el contenido de humedad de los agregados para controlar la cantidad de agua de mezclado.



Figura 16. Mezcla de hormigón permeable con cantidad adecuada de agua.



Figura 17. Mezcla de hormigón permeable con cantidad insuficiente de agua.



Figura 18. Mezcla de hormigón permeable con cantidad excesiva de agua.

La calidad del agua es analizada en la norma ACI 301-05. Como regla general, el agua potable es adecuada para usar en hormigón. El agua reciclada de operaciones de producción de hormigón también es apropiada, siempre y cuando cumpla con los requerimientos normativos (por ejemplo: ASTM C 94). Si existe alguna duda en cuanto a la idoneidad del agua, se recomienda realizar ensayos de caracterización.

3.5. Aditivos

Al igual que en el hormigón convencional, en el hormigón permeable los aditivos químicos son utilizados para obtener ciertas propiedades especiales. Retardadores y adiciones estabilizadoras de la hidratación son utilizadas usualmente en el hormigón permeable, debido a su rápido tiempo de fraguado. Incorporadores de aire pueden reducir el daño generado por los ciclos de congelamiento - descongelamiento. Aditivos que faciliten la colocación y la protección del hormigón permeable también son utilizadas.

El uso de estos aditivos debe seguir de cerca las recomendaciones del fabricante. Es importante recordar que la utilización de adiciones suele alterar el contenido de agua de la mezcla, normalmente reduciendo la cantidad de agua necesaria.

3.6. Mezcla de prueba

Es conveniente conocer el material que está utilizando. Al ser un material nuevo en nuestro medio, tanto propietarios, contratistas y productores deberán dar los pasos necesarios para aprender cómo aplicar mejor esta tecnología.

Cuando se utilice el hormigón permeable se debe preparar una mezcla de prueba y colocar en algún sitio de prueba, o en algún elemento secundario, utilizando los mismos procedimientos a utilizar en obra, utilizando los ingredientes y proporciones aprobadas para el proyecto, de manera que todos sepan y entiendan lo que se espera. La comunicación con el propietario, el contratista general y la inspección, es importante para hacerles saber lo que deben esperar durante y después de la construcción.

Se recomienda a su vez, la realización de pastones de prueba y de caracterización, con antelación suficiente a la realización de los trabajos, con el fin de comprobar la capacidad de dosificación de la mezcla, y que se alcanzan los parámetros de diseño.

4. DISEÑO HIDROLÓGICO Y ESTRUCTURAL

4.1. Bases para el diseño

Hay dos factores que determinan el espesor de los pavimentos permeables: las propiedades hidráulicas, como la permeabilidad y el volumen de poros, y las propiedades estructurales (mecánicas), como la resistencia y rigidez.

El espesor de los pavimentos permeables se determina en función de: a) las propiedades hidráulicas (permeabilidad y volumen de poros); y b) las propiedades estructurales o mecánicas (resistencia y rigidez) de diseño. Es decir, el hormigón permeable usado en sistemas de pavimentos debe ser diseñado para soportar las cargas de tránsito y contribuir positivamente a la estrategia de gestión de precipitaciones específicas del sitio.

En el diseño, se seleccionan las propiedades materiales y el espesor apropiado, así como las demás características necesarias para alcanzar, simultáneamente, los requerimientos hidrológicos y estructurales (las cargas de tráfico previstas). Es decir, los requerimientos hidrológicos y estructurales se analizan de forma independiente, considerado para el diseño el pavimento de mayor espesor obtenido.

En esta sección se presenta una revisión general de ambos aspectos, hidrológico y estructural, del diseño de pavimentos de hormigón permeable. Para mayor detalle, se recomienda recurrir a la bibliografía especializada, como (Tennis *et al.*, 2004).

4.2. Consideraciones del Diseño Hidrológico

El diseño hidrológico de un pavimento de hormigón permeable debe considerar muchos factores. Las tres consideraciones principales son la cantidad de precipitación esperada, las características del pavimento, y las propiedades del suelo subyacente. Sin embargo, el factor hidrológico que controla el diseño de un sistema de hormigón permeable es la intensidad de escurrimiento superficial que puede ser tolerado. La cantidad de escurrimiento es siempre menor que el total de lluvia porque una porción de lluvia es capturada en pequeñas depresiones del terreno, parte infiltrada al suelo, y otra es interceptada por la cobertura del terreno. El escurrimiento es también función de las propiedades del suelo, en particular de la velocidad de infiltración: suelos arenosos y secos toman agua rápidamente, mientras que arcillas compactas casi no absorben agua durante el tiempo de interés para mitigar el escurrimiento por tormentas. El escurrimiento también está afectado por la naturaleza de la tormenta misma; diferentes tamaños de tormenta resultan en diferentes cantidades de escurrimiento, por lo que la selección de una tormenta de diseño apropiada es importante. Esta sección discute brevemente estos temas.

En muchas situaciones, el hormigón permeable simplemente reemplaza una capa impermeable. En otros casos, el sistema de pavimentos de hormigón permeable debe ser diseñado para gestionar mucha más agua de lluvia que la que caerá solamente en el pavimento en sí. Estas dos aplicaciones pueden ser denominadas mitigación “pasiva” y “activa” del escurrimiento, respectivamente. Un sistema de mitigación pasiva puede capturar mucha agua, si no toda, de la “primera descarga” (*first flush*), pero no está pensada para compensar excesos de escurrimiento de otras superficies impermeables

adyacentes. Un sistema de mitigación activa es diseñado para mantener los escurrimientos en sitio a determinado nivel. El hormigón permeable usado en sistemas de mitigación activa debe gestionar también los escurrimientos de otras zonas/instalaciones del sitio, incluyendo edificios, áreas pavimentadas de hormigón convencional o zonas amortiguadoras (*buffer*) que pueda haber. Cuando se usa un sistema de mitigación activo, el cordón, la cuneta, drenaje y cobertura del terreno, deben asegurar que el flujo de agua hacia el sistema de pavimento permeable no traiga sedimentos ni suelo que pueda obstruir el sistema. Un estudio de viabilidad encontró que, usando hormigón permeable en un estacionamiento del tamaño de una cancha de fútbol, aproximadamente 3.5 Ha de una zona urbanizada, actuaría hidrológicamente como si fuera pasto (Tennis *et al.*, 2004).

4.2.1. *Diseño hidrológico del pavimento*

Se deben considerar dos condiciones cuando se diseña el sistema de gestión de lluvia de tormenta con hormigón permeable: permeabilidad y capacidad de almacenamiento. Debe ser evitado el escurrimiento superficial excesivo, causado ya sea por una baja permeabilidad o por una capacidad de almacenamiento inadecuada.

4.2.2. *Permeabilidad*

En general, la permeabilidad del hormigón no es una limitante crítica de los criterios de diseño. Como caso extremo, se puede considerar un sistema de pavimento pasivo de hormigón permeable sobre un suelo con buena capacidad de drenaje. Para el diseño se debe asegurar que la permeabilidad sea suficiente para evacuar toda el agua que llueva sobre la superficie del pavimento permeable.

Si se toma como ejemplo una lluvia de diseño habitual para Montevideo para sistemas domésticos, se puede tomar una intensidad de lluvia en el orden de 2 mm/min (0.033 mm/s). Se puede ver que incluso para permeabilidades bajas del hormigón permeable (en torno a 2 mm/s, ver apartado 2.3.2), la capacidad de filtración está varios ordenes de magnitud por encima de lo necesario para que comience a ser un factor limitante.

La permeabilidad del hormigón permeable no es un factor de control práctico para el diseño. Es habitual que, la velocidad de infiltración a través de la subrasante, o la capacidad de almacenamiento, puedan ser más restrictivas (ver apartado 4.2.4).

A pesar de esto, se debe considerar una permeabilidad mínima, previendo que se tendrá una reducción gradual de la permeabilidad, debido a la colmatación de los poros, incluso con medidas de mantenimiento adecuadas.

4.2.3. *Capacidad de almacenamiento*

La capacidad de almacenamiento de un sistema de hormigón permeable se diseña típicamente para eventos de lluvia específicos, que son establecidos según requerimientos locales. El volumen total de lluvia es importante, pero la velocidad de infiltración del suelo también debe ser considerada.

La capacidad de almacenamiento total de un sistema de hormigón permeable incluye la capacidad del pavimento de hormigón permeable y la capacidad de la base (ver Figura 19). La capacidad de almacenamiento teórica del hormigón permeable está asociada a su porosidad efectiva: la porción del hormigón permeable que puede ser llenada por lluvia

en servicio. Si el hormigón permeable tiene 15 % de porosidad efectiva, entonces cada 5 cm de espesor de pavimento puede contener 7.5 mm de lluvia. Por ejemplo, un pavimento de espesor de 10 cm con 15 % de porosidad efectiva sobre una arcilla impermeable puede alojar hasta 15 mm de lluvia.

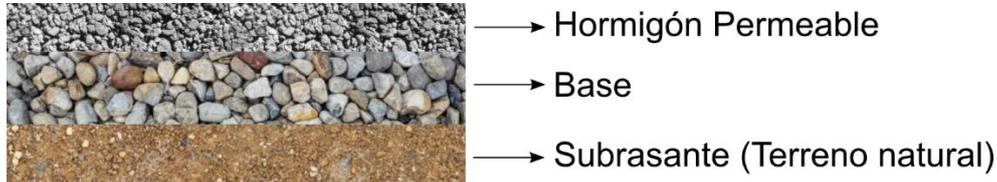


Figura 19. Sección transversal típica de sistema de hormigón permeable.

Otra fuente de almacenamiento importante es la base. Utilizando piedra limpia compactada en la base, se obtiene una porosidad de diseño en el entorno de 40 %; una base convencional de agregado, con mayor contenido de finos, tendrá menor porosidad (alrededor de 20 %). Del ejemplo anterior, si 100 mm de hormigón permeable con 15 % de porosidad se colocan sobre 150 mm de piedra limpia, la capacidad de almacenamiento nominal sería de 75 mm de lluvia:

$$(15\%) * 100 \text{ mm} + (40\%) * 150 \text{ mm} = 15 \text{ mm} + 60 \text{ mm} = 75 \text{ mm}$$

Se puede ver que el efecto de la base en la capacidad de almacenamiento del sistema de pavimento de hormigón permeable puede ser significativo. En el ejemplo descrito, la base aporta el 80% de la capacidad de almacenamiento, y la capa de hormigón permeable el 20%.

Una hipótesis crítica en este cálculo es que el sistema entero está nivelado. Cuando la superficie no está a nivel, los espesores del pavimento y base deben ser diseñados para alcanzar los objetivos deseados de escurrimiento. Si la parte superior de la losa no está nivelada, y la velocidad de infiltración de la subrasante fue excedida, las partes altas de la losa no se llenarán, y el exceso de lluvia puede escurrir por dentro del pavimento a las partes bajas. Una vez se haya llenado, la lluvia escurrirá del pavimento, limitando los efectos beneficiosos del hormigón permeable.

Estas pérdidas de volumen utilizable debido a las pendientes pueden ser significativas, e indican la influencia de la pendiente en el diseño del pavimento. Alternativamente, es posible considerar en estos casos la utilización de otras opciones con un mayor grado de complejidad para la gestión del flujo de agua, como zonas estancas escalonadas.

4.2.4. Subrasante

La infiltración al terreno subyacente es importante tanto para los sistemas activos como para los pasivos. Estimar la velocidad de infiltración con fines de diseño es una tarea imprecisa, ya que el proceso real de infiltración al suelo es complejo. El infiltrómetro de doble-anillo (*double-ring infiltrometer*) (ASTM D 3385-18) describe un procedimiento para la determinación de la velocidad de infiltración. De todos modos, el uso de modelos simples, que consideran estimaciones preliminares de velocidades de infiltración resulta suficientemente preciso, obteniéndose volúmenes de infiltración conservadores. Como regla general, suelos con velocidades de infiltración de 12 mm/hr son apropiados como subrasantes bajo un pavimento permeable.

Suelos de granulometría abierta de piedra partida, grava y arena han sido evaluadas favorablemente como subrasantes para retener y almacenar agua de escurrimiento superficial reduciendo así los efectos de escurrimientos rápidos de tormenta. Por su parte, suelos arcillosos y otras capas impermeables pueden impedir el desempeño del pavimento permeable y pueden necesitar ser modificados para permitir la correcta retención e infiltración de las precipitaciones. En algunos casos, las capas impermeables podrían necesitar ser excavadas y reemplazadas. Si los suelos fueran impermeables, sobre ellos debería colocarse una base porosa de mayor espesor. Este espesor debe proporcionar el volumen de retención requerido para cada proyecto en particular.

En suelos compactos de drenaje pobre, se pueden usar menores velocidades de infiltración para el diseño. Diseños en suelos con un contenido significativo de limo y arcilla, o nivel freático alto, deben ser diseñados con precaución. Es importante recordar que el escurrimiento natural en áreas limosas o arcillosas es relativamente alto, incluso con cobertura vegetal, y el correcto diseño y construcción de hormigón permeable puede proveer beneficios en casi todas las situaciones. Al diseñar, el tiempo total de desagüe (tiempo en el cual el 100 % de la capacidad de almacenamiento es recuperada) debería ser lo más corto posible, y en términos generales, no exceder los cinco días (Tennis *et al.*, 2004).

4.3. Consideraciones del Diseño Estructural

En esta sección se indican los lineamientos para el diseño estructural de pavimentos de hormigón permeable. Los procedimientos descritos sientan las bases para el análisis de datos conocidos y ofrecen métodos para determinar el espesor estructural de pavimentos de hormigón permeable basados en criterios de desempeño.

El hormigón permeable presenta una matriz y unas características de comportamiento distinto al hormigón convencional con cemento Portland u otro material de pavimento. Si bien estas características se diferencian del hormigón convencional, igualmente son predecibles y medibles. Existen proyectos de excelente desempeño en servicio durante 20 a 30 años que brindan buena evidencia empírica relacionada a las propiedades materiales, subrasantes aceptables, y procedimientos de construcción.

4.3.1. Diseño Estructural del Pavimento

Los pavimentos de hormigón permeable pueden ser diseñados utilizando procedimientos de diseño de pavimento estándar (AASHTO, 1993, ACI 325.9R, o ACI 330R) o utilizando cálculos estructurales derivados de un procedimiento de diseño de pavimento flexible. Sin importar qué procedimiento se use, lineamientos para propiedades de suelos subrasantes, características de materiales de hormigón permeable y cargas de tránsito deberían ser consideradas.

4.3.2. Suelos de base y Subrasante

El diseño de la base de un pavimento de hormigón permeable debería incluir normalmente una capa base permeable de 150 a 300 mm de espesor. La base permeable puede ser conformada por agregado de 25 mm de tamaño máximo o un suelo naturalmente presente en el lugar que sea predominantemente arenoso con cantidades moderadas de limo y arcilla, y pobremente graduado, a no ser que se tomen precauciones especiales (ver

apartado 4.3.3). Ambos tipos de materiales ofrecen buenos valores de soporte, definido en términos del módulo de balasto de Westergaard (k_w). Se sugiere que k_w no exceda 54 MPa/m. En general, valores de k_w entre 40 y 48 MPa/m son apropiados para propósitos de diseño (Tennis *et al.*, 2004). La Tabla 2 presenta una lista con características de suelo y sus valores aproximados de k_w .

El módulo compuesto de reacción de la subrasante se define usando una relación teórica entre los valores de k_w (en MPa/m) dados por el ensayo de carga de placa (ASTM D 1196) o estimado a partir del módulo elástico del suelo subrasante (AASHTO T 292), como:

$$k_w = 2,03 * M_R$$

donde M_R es el módulo resiliente del suelo subyacente, en MPa. Dependiendo de las prácticas locales, “California Bearing Ratio” (CBR), “R-Value” y otros ensayos pueden usarse para determinar el soporte que provee la subrasante. En la Tabla 2 también se muestran algunas relaciones empíricas entre k_w y los parámetros determinados por otros métodos usuales: CBR (ASTM D 1883), o “R-Value test” (ASTM D 2844).

Tabla 2. Rangos aproximados de k_w y tipos de bases (Tennis *et al.*, 2004).

Tipo de base	Soporte	k_w (MPa/m)	CBR	R-Value
Suelos de grano fino con mayoría de limo y arcillas	Bajo	20 - 34	2.5 - 3.5	10 - 22
Arenas y gravas con contenido moderado de limo y arcillas	Medio	35 - 49	4.5 - 7.5	29 - 41
Arenas y gravas con bajo contenido de limo y arcillas	Alto	50 - 60	8.5 - 12	45 - 52

4.3.3. Arcillas y Suelos Altamente Expansivos

Se deben tomar consideraciones especiales si se fuera a diseñar un pavimento de hormigón permeable sobre áreas con suelos que contengan cantidades significativas de arcillas densas, materia orgánica y suelos expansivos.

En estos casos, es recomendable excavar los materiales con mucha materia orgánica y reemplazarlos por suelos con alto contenido de relleno de grano grueso. Además, el diseño puede incluir filtros de arena, piedra de granulometría abierta, y grava, para proporcionar buena contención e incrementar los valores de soporte. Otra alternativa de diseño es una base de arena colocada sobre un textil de drenaje de pavimento para contener las partículas finas.

4.3.4. Cargas de tráfico

La carga de tráfico que se prevé solicite al pavimento permeable puede ser caracterizada por la cantidad de ejes equivalentes que transitarán (considerando como base el eje simple de 80 kN), por el tráfico promedio diario, o por el promedio diario de tráfico de camiones. Dado que el tráfico de camiones tiene mayor impacto que los autos en los pavimentos,

una correcta estimación del tránsito de este tipo de vehículos es crítico para el correcto diseño del pavimento.

4.3.5. Propiedades Materiales Relacionadas al Diseño de Pavimentos

El diseño de un pavimento rígido está gobernado por su resistencia a tracción por flexión, ya que esta es la que permite la distribución de carga de forma uniforme en las capas inferiores. Dado a que los ensayos de resistencia a tracción por flexión tienen gran variabilidad en hormigones permeables, se suele trabajar con relaciones empíricas entre resistencias a compresión y tracción por flexión.

A su vez, una misma dosificación de hormigón, para un pavimento de hormigón permeable, podrá arrojar un amplio rango de valores de resistencias y permeabilidades, dependiendo del grado de compactación. Ensayos previos a la construcción deben determinar la relación entre resistencia a compresión, resistencia a tracción por flexión, así como la densidad y porosidad de los materiales propuestos para usar. La resistencia determinada puede usarse en normas y programas de diseño de pavimentos de hormigón convencional.

Dado que la resistencia determina el nivel de desempeño del pavimento y su vida útil, las propiedades del hormigón permeable deben ser evaluadas cuidadosamente y verificadas durante la construcción del pavimento.

5. CONSTRUCCIÓN

5.1. Comentarios Generales

La secuencia de procedimientos necesarios para la construcción de pavimentos de hormigón permeable incluye la preparación de la base, el mezclado, el transporte, la colocación y nivelación, la compactación, la instalación de juntas y el curado del hormigón. La secuencia es mostrada en forma esquemática en la Figura 20. Las características del hormigón permeable hacen que estos procedimientos difieran de los utilizados para el hormigón convencional. Estas particularidades se detallan en el presente capítulo.

5.2. Preparación del lugar

La uniformidad de la base es clave para la colocación del pavimento permeable. Al igual que en otros tipos de pavimentos, las huellas de camión y otras irregularidades deben ser suavizadas y compactadas previo al llenado. Para obtener un soporte consistente es usual recomendar compactar como mínimo a un 90% o 95% de la densidad teórica según AASHTO T 180; sin embargo, incrementar la densidad de la base reduce su permeabilidad. Ingenieros geotécnicos locales deberían ser consultados para conocer las propiedades de los suelos subrasantes. Dado que la preparación de la base y subrasante son componentes críticos para el desempeño de pavimentos de hormigón permeable, se refiere al lector al capítulo “4. Diseño hidrológico y estructural” de esta guía por más información. En la Figura 21 se muestra una imagen durante la preparación del lugar previo a la llegada del mixer.

Debido a la alta sensibilidad que presenta el hormigón permeable frente a cambios en el contenido de agua, previo a la colocación del hormigón permeable se debe humedecer (sin encharcar) la base donde se colocará el pavimento. De esta manera se evita que la base absorba parte del agua de mezclado del hormigón permeable. Esta práctica también es recomendada para pavimentos de hormigones convencionales cuando las condiciones de evaporación son elevadas; pero es mucho más importante en hormigón permeable debido a que sus grandes poros permiten mayor velocidad de secado, llevando a reducciones de resistencia y durabilidad, en condiciones no tan extremas de evaporación.

5.3. Mezclado, transporte y descarga.

Se requiere una especial atención durante el transporte y colocación del hormigón permeable debido a que presenta un bajo contenido de agua. En particular, se debe evitar el uso de transportes abiertos para grandes distancias.

El bajo asentamiento genera que la descarga de los camiones mezcladores (*mixers*) sea más lenta que para el hormigón convencional; los mezcladores que presentan grandes aberturas de descarga o los mezcladores para pavimentación proporcionan un tiempo de descarga menor. En la Figura 22 se muestra la descarga del hormigón permeable desde un camión mixer.



Figura 20. Secuencia general de construcción de pavimentos de hormigón permeable.

El hormigón permeable fresco debería ser descargado completamente dentro de una hora luego de iniciada la mezcla. El uso de adiciones químicas retardadoras o estabilizadoras pueden extender dicho tiempo de descarga a una hora y media, y a su vez facilitar la descarga, reduciendo los tiempos de colocación. Ambientes con condiciones de temperaturas altas y viento generan efectos más significativos en comparación con hormigones convencionales, siendo necesario reducir los tiempos de colocación, adaptando la cuadrilla de trabajo o reduciendo la cantidad de material en cada camión mezclador.



Figura 21. Preparación del terreno previo a la colocación del hormigón permeable.



Figura 22. Descarga de hormigón permeable desde mixer.

5.4. Control de recepción en estado fresco

Previo a la colocación del material se deben realizar los ensayos de recepción en estado fresco. Para el hormigón permeable, estos consisten generalmente en la inspección visual y en el ensayo de densidad en estado fresco.

La inspección visual de la mezcla en estado fresco es un indicador inicial de la calidad de la mezcla. La forma de evaluarla es tomar un puñado de hormigón fresco y observar sus características. Idealmente el material debe presentar cierto brillo y no desarmarse (ver Figura 23). Si la bola se desarma y no presenta brillo, se tiene una pasta seca. Por el contrario, si se observa una pasta con brillo excesivo y la bola se desarma, se tiene una mezcla con exceso de agua (Ver apartado 3.4).

Dada la consistencia rígida del material, el método del Cono de Abrams no es útil para determinar la calidad del material, ya que con este ensayo se obtienen en general asentamientos prácticamente despreciables (ver Figura 24). Por este motivo, como control de calidad para la recepción en obra es más común utilizar el ensayo de densidad en estado fresco (ver Figura 24).



Figura 23. Ejemplo de hormigón permeable con apariencia visual adecuada.

El valor aceptable para la densidad depende del diseño nominal de la mezcla (en general entre 1600 kg/m^3 y 2000 kg/m^3). El criterio de aceptación suele ser obtener una densidad que no difiera en más de 80 kg/m^3 , por exceso o por defecto, del valor nominal del diseño de la mezcla. Se puede determinar la densidad mediante la norma ASTM C1688. La frecuencia de los ensayos es de por lo menos una vez al día, o cuando la inspección visual de indicios de un cambio en la dosificación.



Figura 24. Ensayo del cono de Abrams en hormigón permeable (no recomendable como control de recepción), y ensayo de densidad en estado fresco (ensayo recomendado).

En algunas ocasiones, el hormigón no llega a obra con la consistencia o aspecto de la mezcla adecuado. Si bien se reconoce que añadir agua en la mezcla a pie de obra es una práctica habitual, se debe resaltar que esta no es una práctica recomendable, menos aún si se realiza sin los controles y regulación adecuada.

Se puede nombrar al MRS40 *Concrete Pavement Base* (MRS40, 2018) como ejemplo de especificaciones que permiten la modificación del agua a pie de obra en condiciones específicas y con los cuidados y controles adecuados. Para poder realizar este ajuste, las

mezclas deben tener las tolerancias previamente caracterizadas, tanto por defecto como por exceso de agua, y la modificación del agua debe estar dentro de este margen, con un coeficiente de seguridad apropiado. Además, las responsabilidades de la operación deben estar correctamente definidas antes de comenzar los trabajos. Esta operación debe realizarse de manera cuidadosa debido a que el control de la cantidad de agua que se está agregando es más dificultoso en condiciones de obra, lo que implica un mayor riesgo.

5.5. Colocación

Existen diferentes técnicas para la construcción del hormigón permeable. Al igual que para el hormigón convencional, las diferentes técnicas son diseñadas y pensadas para facilitar el procedimiento en un lugar en particular. Es importante mencionar que, dado que el material no es bombeable, el acceso al lugar de hormigonado constituye una etapa fundamental de la planificación previa.

Se debe colocar el material de forma continua, y su esparcimiento se debe realizar con rapidez. Se utiliza encofrado convencional. La nivelación se logra mediante el uso de reglas vibratorias o manuales. Las reglas vibratorias deben tener un vibrado ajustable a bajas frecuencias, ya que de lo contrario se puede correr el riesgo de segregar la pasta del agregado.



Figura 25. Ejemplo de colocación y nivelación con regla manual.

Para pavimentos es usual colocar una altura extra de hormigón fresco por sobre el nivel del encofrado (15 a 25 mm), para facilitar la posterior compactación. Una técnica para lograr esta sobrealtura es colocar una tira o banda de madera sobre el encofrado. El hormigón fresco se esparce y nivela con esa sobrealtura, luego se retira la tira de madera, y se procede a la compactación del pavimento para alcanzar el nivel de diseño dado por el encofrado. Esta técnica se muestra en la Figura 26.



Figura 26. Nivelación con sobrealtura y aspecto previo a la compactación luego de retirar listón.

5.6. Compactación y Terminación

Existen diferentes herramientas para compactar el hormigón permeable fresco. Uno de los métodos más utilizados es la compactación mediante un “rodillo pesado”. El mismo debe cubrir el ancho total de la zona a compactar y ser lo suficientemente pesado como para alcanzar la compactación deseada. En la Figura 27 se muestra el proceso de compactación y un detalle del rodillo. Al realizar la compactación con rodillo no es necesario realizar tareas de terminación adicionales. En particular, la terminación con llana puede ser perjudicial, ya que puede desplazar la pasta libre en la superficie, tapando los poros en la zona superior y reduciendo la permeabilidad del pavimento.

Luego de la compactación con rodillo pesado, puede ser necesario realizar ajustes locales, tanto por sobre espesores como depresiones locales. Se suele utilizar un “rodillo manual” o un pisón para nivelar estas áreas (Ver Figura 28). En una depresión, o zona irregular, es posible retirar parte del material, volver a colocar material fresco, y volver a nivel localmente con el rodillo manual o el pisón. En ocasiones puede ser también conveniente, antes de realizar la compactación con el rodillo pesado, realizar una compactación local previa en los laterales y bordes del pavimento.



Figura 27. Ejemplo de compactación mediante “rodillo pesado” e imagen del rodillo.



Figura 28. Ejemplo de reparación y compactación local mediante pisón y rodillo manual.

5.7. Instalación de juntas

Para prevenir la creación de fisuras aleatorias en el pavimento es usual realizar juntas de contracción. Sin embargo, debido a que el hormigón permeable tiende a tener menor retracción que el convencional, la separación entre juntas es usualmente mayor que en pavimentos de hormigón convencional. Para grandes superficies se han recomendado separaciones de juntas de 6 m (Tennis *et al.*, 2004), aunque algunas instalaciones han tenido separaciones de juntas de 13,5 m o más (Paine 1992). Se debe respetar también una relación de forma de los paños, teniendo el lado mayor una dimensión menor a 1,5 veces la del lado menor.

Al igual que en pavimentos convencionales, juntas de un cuarto del espesor de la losa proporcionan un buen control de fisuración. A su vez, en los casos que se realiza el pavimento en contacto con un pavimento rígido existente, la prevención de fisuras reflejadas se realiza instalando juntas en las mismas posiciones que en los pavimentos adyacentes

Debido a que el tiempo de fraguado y la retracción son acelerados en la construcción del hormigón permeable, la instalación de juntas debería realizarse en seguida luego de la compactación. Una opción para ejecutar las juntas es utilizar un rodillo de junta “*corta-pizza*”. Esta es una herramienta diseñada específicamente para este fin, que consiste en un rodillo macizo manual, con un disco de acero. En la Figura 29 se muestra el rodillo de junta. Otra técnica, más apropiada para secciones pequeñas, es hundir una regla de acero hasta la profundidad requerida, utilizando un martillo. En la Figura 30 se muestra la utilización de esta técnica.

La realización de juntas cortando con sierra también es posible, pero no es lo preferible. Esto es debido a que el líquido producido durante las operaciones de corte puede bloquear los poros del pavimento y, además, suelen ocurrir desprendimientos excesivos de los agregados junto a las juntas. Además, para cortar con sierra es necesario remover las coberturas, lo que interrumpe el curado; de hacer esto, se recomienda re-humedecer la superficie previo a volver a cubrir.



Figura 29. Rodillo “corta-pizza” para realización de juntas.

Algunos pavimentos de hormigón permeable se han realizado sin juntas, ya que la fisuración aleatoria no se ve como una deficiencia importante en cuanto a la estética del

pavimento (considerando su textura, la junta es prácticamente invisible), y tampoco tiene incidencia significativa en la integridad estructural del pavimento.



Figura 30. Instalación de juntas mediante perfil te.

5.8. Curado

Debido a la estructura de espacios vacíos del material, la superficie expuesta a la atmósfera es mayor. Por esta razón, para asegurar la calidad del material, el curado es particularmente importante en el proceso de ejecución. Bajo condiciones climáticas favorables (humedad alta y velocidad de viento baja), el procedimiento de curado debe comenzar dentro de los primeros 20 minutos posteriores a la colocación. Bajo condiciones no tan favorables, el proceso debe comenzar antes.

El procedimiento de curado consiste en colocar una lámina plástica resistente (Polietileno, cumpliendo con las condiciones de la ASTM C171) de dimensión suficiente para cubrir todo el ancho del pavimento construido. En la Figura 31 se muestra un pavimento de hormigón permeable durante el proceso de curado.

La función de esta lámina es impedir que la humedad del material se escape del material hacia la atmósfera. Para ello debe preverse algún mecanismo para asegurar lateralmente la lámina. No es recomendable utilizar materiales granulares como arena y tierra, ya que los mismos podrían eventualmente tapar los orificios del material. Para un curado adecuado, se recomienda mantener la cubierta plástica entre 7 y 10 días, rehumedeciendo el material en caso de ser necesario. En este tiempo no es recomendable transitar sobre el pavimento.



Figura 31. Curado de hormigón permeable utilizando lámina plástica.

5.9. Paño de prueba

En los primeros pavimentos que se realicen, y hasta tener experiencia suficiente con esta tecnología, se deben realizar paños de prueba con el mismo espesor y con el mismo material, técnicas, equipos, personal, tiempo, secuencia de operaciones, y período de curado que se utilizará para el proyecto de pavimento. Se recomienda realizar por lo menos un paño de prueba de 10 m².

(Página en blanco)

6. CONTROL EN ESTADO ENDURECIDO Y MANTENIMIENTO

6.1. Inspección y ensayos durante la construcción

No existe una metodología de control de calidad universalmente aceptada. La forma de control no es trivial, debido a que las propiedades resistentes e hidráulicas del pavimento dependen del proceso constructivo (en especial de la compactación).

Una forma directa de evaluación sería mediante la extracción de testigos (apartado 6.2), sin embargo, este proceso puede ser tedioso. Alternativamente, se puede determinar la relación entre las resistencias de testigos extraídos y probetas llenadas a pie de obra. La calibración de esta relación se puede determinar durante la elaboración de un paño de prueba. En base a esta relación, se controla por un lado la resistencia de probetas a compresión, y por otro, el procedimiento constructivo.

El control de probetas a compresión se realiza con una frecuencia similar a la del hormigón convencional, pero con 6 probetas por pastón. El mayor número de probetas por pastón se justifica debido a la mayor variabilidad de este material. La energía de compactación de las probetas de compresión tampoco está normalizada. Se propone compactar las probetas para el ensayo a compresión, llenándolas en 3 capas, las cuales se compactarán con 9 golpes de *martillo de Proctor normal* cada una.

6.2. Inspección y ensayos luego de la construcción

Luego de siete días pueden extraerse testigos (ASTM C42) y medir espesor y densidad como garantía de calidad y ensayos de aceptación. En caso de extracción de testigos, estos deben ser lavados inmediatamente para remover las impurezas y suciedad que se producen por el proceso de aserrado.

Típicamente se extraen tres testigos cada 450 m². Los criterios comunes de aceptación del espesor es que ningún testigo puede estar por debajo del espesor de diseño en más de 15 mm. Cabe destacar que el pavimento de hormigón permeable presenta una mayor variabilidad en el espesor cuando se coloca sobre una base de alto contenido de vacíos.

La densidad del material, de acuerdo con la norma ASTM C140, proporciona medidas de aceptación. Los requerimientos típicos establecen que la diferencia de las densidades promedio medidas, con respecto a la densidad nominal de la mezcla, sean menores a 80 kg/m³. El ensayo de resistencia a la compresión en probetas cilíndricas no es recomendado debido a la dependencia entre la resistencia a la compresión y la compactación.

Existe un método normalizado para determinar la tasa de infiltración *in situ* de un pavimento de hormigón permeable. El mismo se presenta en la norma ASTM C1701. Es un ensayo práctico que permite evaluar la capacidad permeable superficial del pavimento. Se recomienda realizar este ensayo anualmente en diferentes zonas del pavimento permeable para evaluar la capacidad hidráulica general del pavimento, y determinar si existe alguna zona en particular que presente una disminución en su capacidad permeable y, por lo tanto, sea necesario realizar algún mantenimiento. En la Figura 32 se muestra una foto durante la ejecución de dicho ensayo.



Figura 32. Ensayo de tasa de infiltración según ASTM C1701.

6.3. Mantenimiento

La mayoría de los pavimentos de hormigón permeable tienen buen funcionamiento con poco mantenimiento, aunque depende del entorno en el que se ubica y el potencial aporte de contaminantes. El mantenimiento del hormigón permeable consiste principalmente en la prevención de obstrucciones de los poros. En la preparación del sitio, previo a la construcción, debe diseñarse el drenaje de la zona circundante para prevenir el flujo de materiales por la superficie del pavimento. Suelo, rocas, hojas y otros residuos pueden infiltrarse en los huecos e impedir el flujo de agua, disminuyendo la utilidad del pavimento. Materiales de la zona como arena y la capa superior del suelo no deben colocarse sobre el hormigón permeable ni siquiera temporalmente.

Es recomendable realizar barridos en zonas y épocas en que se pueda acumular material suelto sobre el pavimento, como hojas de árboles durante el otoño. Con menor periodicidad (que puede ir desde mensual a anual, según el caso) es también recomendable realizar una limpieza más profunda de los poros. Las maneras más efectivas de realizar la limpieza de los poros son el lavado con agua a presión, el aspirado de la superficie, y el soplado a presión. El lavado a presión de las obstrucciones del pavimento de hormigón permeable restablece, en algunos casos, desde un 80% a un 90% la permeabilidad (Tennis *et al.*, 2004). Es importante cuidar la presión con la que se realiza el lavado con agua a presión, ya que el mismo podría dañar el hormigón. Cabe resaltar que las prácticas de mantenimiento de pavimentos de hormigón permeable continúan siendo desarrolladas.

7. REFERENCIAS

AASHTO T 180, *Moisture-Density Relations of Soils Using a 10-Pound (4.54-kg) Rammer and an 18-Inch (457-mm) Drop*, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C., EE. UU.

AASHTO T 292, 1997, *Standard Method of Resilient Modulus of Subgrade Soils and Untreated Base/Subbase Materials*, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C., EE. UU.

AASHTO, 1993, *Guide for Design of Pavement Structures*, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C., EE. UU.

ACI Committee 201, 2008, *ACI 201.2R-08 Guide to Durable Concrete*, American Concrete Institute, Farmington Hills, EE. UU.

ACI Committee 301, 2005, *ACI 301-05 Specifications for Concrete*, American Concrete Institute, Farmington Hills, EE. UU.

ACI Committee 325, 2015, *ACI 325.9R Guide for Construction of Concrete Pavements*, American Concrete Institute, Farmington Hills, EE. UU.

ACI Committee 330, 2008, *ACI PRC-330-08 Guide for the Design and Construction of Concrete Parking Lots*, American Concrete Institute, Farmington Hills, EE. UU.

ACI Committee 522, 2010, *ACI 522R-10 Report on Pervious Concrete*, American Concrete Institute, Farmington Hills, EE. UU.

ASTM C138 / C138M - 17a, 2017, *Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete*, ASTM international, West Conshohocken, PA, EE. UU.

ASTM C140 / C140M - 20a, 2020, *Standard Test Methods for Sampling and Testing Concrete Masonry Units and Related Units*, ASTM international, West Conshohocken, PA, EE. UU.

ASTM C1701 / C1701M - 17a, 2017, *Standard Test Method for Infiltration Rate of In Place Pervious Concrete*, ASTM international, West Conshohocken, PA, EE. UU.

ASTM C1754 / C1754M – 12, 2012, - *Standard Test Method for Density and Void Content of Hardened Pervious Concrete*, ASTM international, West Conshohocken, PA, EE. UU.

ASTM C42 / C42M – 20, 2020, *Standard Test Method for Obtaining and Testing Drilled Cores and Sawed Beams of Concrete*, ASTM international, West Conshohocken, PA, EE. UU.

ASTM C78/C78M – 10, 2010, *Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading)*, ASTM international, West Conshohocken, PA, EE. UU.

ASTM C94 / C94M – 21, 2021, *Standard Specification for Ready-Mixed Concrete*, ASTM international, West Conshohocken, PA, EE. UU.

ASTM D1196 / D1196M – 12(2016), 2016, *Standard Test Method for Nonrepetitive Static Plate Load Tests of Soils and Flexible Pavement Components, for Use in Evaluation and Design of Airport and Highway Pavements*, ASTM international, West Conshohocken, PA, EE. UU.

ASTM C1688 / C1688M – 14, 2014, *Standard Test Method for Density and Void Content of Freshly Mixed Pervious Concrete*, ASTM international, West Conshohocken, PA, EE. UU.

ASTM D1883 – 16, 2016, *Standard Test Method for California Bearing Ratio (CBR) of Laboratory-Compacted Soils*, ASTM international, West Conshohocken, PA, EE. UU.

ASTM D3385 – 18, 2018, *Standard Test Method for Infiltration Rate of Soils in Field Using Double-Ring Infiltrometer*, ASTM international, West Conshohocken, PA, EE. UU.

Brite/Euram Report, 1994, *Surface Properties of Concrete Roads in Accordance with Traffic Safety and Reduction of Noise*, Brite/Euram Project BE3415.

Díaz Vázquez, A., Herrera Larrea, T. y Marrero Moreno, I. *Estudio de las características del hormigón permeable y su implementación en el Uruguay*. Tesis de grado. Montevideo. Udelar. FI. IET., 2020. <https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/handle/20.500.12008/23909>

J. Paine, 1992, *Portland Cement Pervious Pavement Construction*, Concrete Construction, pp 655-659.

Longjia Chu, Tien F. Fwa, y Kiang H. Tan, 2017, *Laboratory Evaluation of Sound Absorption Characteristics of Pervious Concrete Pavement Materials*, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2629 (1), pp 91-103.

MRTS40 Concrete Pavement Base. Transport and Main Roads. 2018. Technical Specification. The State of Queensland (Department of Transport and Main Roads). November 2018

M. Neamitha, T.M. Supraja, 2017, *Influence of Water Cement Ratio and the Size of Aggregate on the Properties of Pervious Concrete*, International Refereed Journal of Engineering and Science (IRJES), 6 (4), pp 09-16.

Neithalath, N., 2004, *Development and Characterization of Acoustically Efficient Cementitious Materials*, PhD thesis, Purdue University, West Lafayette, IN, 269 pp.

Paul D. Tennis, Michael L. Leming, y David J. Akers, 2004, *Pervious Concrete Pavements*, EB302.02, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, and National Ready Mixed Concrete Association, Silver Spring, Maryland, EE. UU.

R.C. Meininger, 1988, *No-Fines Pervious Concrete for Paving*, *Concrete International*, American Concrete Institute, pp 20-27.

V. M. Malhotra, 1976, *No-Fines Concrete — Its Properties and Applications*, *ACI Journal*, pp 628-644.