

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL  
FACULTAD REGIONAL CÓRDOBA  
DIRECCIÓN DE POSGRADO**

**TESIS PARA MAESTRÍA EN INGENIERÍA  
AMBIENTAL**

**Ing. Malena del Valle Monetti**

**2018**







# **HORMIGÓN POROSO CON MATERIALES LOCALES, UNA CONTRIBUCIÓN PARA LA GESTIÓN DE LAS AGUAS DE LLUVIA**

**Directora:** Dra. María Josefina Positieri

.....

**Co-director:** Ing. Carlos Enrique Baronetto

.....

## **Miembros del Tribunal de Tesis**

Dra. Bárbara Belén Raggiotti

.....

Dra. Erica Betiana Díaz

.....

Dra. Mariana Pilar Gatani

.....



*A Marina*





## Resumen

El desarrollo sostenible y su aplicación en la construcción son fundamentales hoy en día en el sector de la ingeniería civil. Dentro de la amplia variedad de procedimientos constructivos que forman parte de la tendencia de construcción sostenible, los pavimentos permeables son un subconjunto importante y ampliamente estudiado dentro de los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) o BMPs (Best Management Practices o Buenas Prácticas Ambientales). Los pavimentos permeables son secciones compuestas de varias capas de materiales de construcción que permiten el paso del agua a través suyo, desde la superficie hasta la base de apoyo, y en conjunto ofrecen la capacidad portante necesaria para resistir un tránsito determinado. Pueden considerarse como una cadena de drenaje sustentable completa por sí mismos, pues proporcionan infiltración, captación, transporte y almacenamiento, al permitir controlar en origen la escorrentía superficial, laminando los flujos de aguas pluviales y ofreciendo además un servicio a la sociedad como pavimentos estéticos, cómodos y seguros.

Los sistemas de drenaje sostenible en general, y los pavimentos permeables en particular, son de gran importancia para mejorar la gestión del agua, recurso indispensable para el desarrollo humano. En los últimos años, debido al rápido desarrollo urbano, los sistemas de drenaje urbano que forman parte del sistema de saneamiento de cualquier ciudad se han visto desbordados en época de lluvias debido a la gran cantidad de agua pluvial que reciben. Así, los problemas económicos más importantes causados por el agua de lluvia en las ciudades están asociados a la escorrentía que genera inundaciones, crecidas, desbordamientos, contaminación difusa y pérdida de servicio de los sistemas de saneamiento. Tras el análisis de estos problemas y de la necesidad de una gestión eficiente del agua de lluvia, se presenta el desarrollo sostenible como la herramienta integral de gestión presente y futura que debe ser aplicada también al drenaje urbano. Así, la ingeniería civil debe ofrecer soluciones a los problemas planteados y estas soluciones deben estar basadas en el concepto de desarrollo sostenible. Es en este punto donde nace el concepto del drenaje sostenible, como elemento fundamental para frenar las consecuencias perniciosas de la defectuosa gestión de aguas pluviales en las ciudades.

Esta tesis contribuye al control del escurrimiento pluvial en áreas urbanas a través del diseño y elaboración de hormigones porosos con materiales locales evaluando su capacidad de infiltración como parte de un pavimento permeable.

Se modelaron dos tipos de pavimentos, uno de pavimento permeable con el hormigón poroso desarrollado y otro de pavimento rígido de hormigón convencional. El modelado se realizó con el programa SWMM 5.1 de EPA de código abierto. El objeto de la modelación fue evaluar el impacto ambiental que genera la escorrentía superficial en un sistema permeable y en uno impermeable.



## Abstract

The sustainable development and its application in construction are fundamental today in the field of civil engineering. Within the wide variety of construction procedures that are part of the trend of sustainable construction, permeable pavements are an important and widely studied subset of Sustainable Urban Drainage Systems (SUDS) or BMPs (Best Management Practices). Permeable pavements are sections composed by several layers of building materials that allow the passage of water through them, from the surface to the base of support, and together offer the necessary bearing capacity to withstand a certain transit. They can be considered as a complete sustainable drainage chain by themselves since they provide infiltration, abstraction, transport, and storage, allowing to control surface runoff, laminating rainwater flows and also offering a service to society as aesthetic pavements, comfortable and safe.

The sustainable drainage systems in general and permeable pavements, in particular, are really important to improving water management, an indispensable resource for human development. In recent years, due to rapid urban development, urban drainage systems that are part of the sanitation system of any city have been overwhelmed in rainy weather due to the large amount of rainwater they receive. Thus, the most important economic problems caused by rainwater in cities are associated with runoff that generates floods, floods, overflows, diffuse pollution and loss of service of sanitation systems. After analyzing these problems and the need for efficient rainwater management, sustainable development is presented as the present and future integral management tool that should be applied to urban drainage as well. Therefore, civil engineering must offer solutions to the problems raised and these solutions must be based on the concept of sustainable development. It is at this point that the concept of sustainable drainage is born, as a fundamental element to curb the pernicious consequences of the faulty management of rainwater in cities.

This thesis contributes to the control of runoff in urban areas through the design and elaboration of porous concrete with local materials evaluating its infiltration capacity as part of a permeable pavement.

Two types of pavements were modeled, one of permeable pavement with the porous concrete developed and the other of rigid pavement of conventional concrete. The modeling was done with the SWMM 5.1 program of open source EPA. The object of the modeling was to evaluate the environmental impact generated by surface runoff in a permeable system and a waterproof system.







## Agradecimientos

A la Universidad Tecnológica Nacional por permitirme la realización de esta maestría mediante el Programa de Becas Bicentenario de Investigación y Posgrado para la formación de Magister en Áreas Tecnológicas Prioritarias.

Al CINTEMAC por permitirme la realización de plan experimental para el desarrollo de esta tesis y a todo el equipo que forma el CINTEMAC.

A mi directora y co director, María Positieri y Carlos Baronetto.

A Ángel Oshiro por guiarme en mis primeros pasos en la investigación.

A Belén, Eliana, Adrián y Sebastián por ayudarme en las distintas etapas de esta tesis.

A mi familia y amigos, en especial a mis hijos y Juan, mi compañero de vida; y a Marce, mi hermano por elección.





## ÍNDICE GENERAL

<b>Dedicatoria</b> .....	I
<b>Resumen</b> .....	III
<b>Abstract</b> .....	V
<b>Agradecimientos</b> .....	IX
<b>Índice de contenidos</b> .....	XI
<b>Lista de Figuras</b> .....	XVII
<b>Lista de Tablas</b> .....	XXII

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

CAPÍTULO I – INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.....	1
I.1. INTRODUCCIÓN .....	3
I.1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA – JUSTIFICACIÓN.....	3
I.2. GESTIÓN DEL ESCURRIMIENTO PLUVIAL EN MEDIOS URBANOS.....	5
I.2.1. DESARROLLO SUSTENTABLE .....	5
I.2.2. URBANIZACIÓN E IMPACTO HIDROLÓGICO.....	7
I.2.3. INUNDACIONES EN ÁREAS URBANAS.....	11
I.3. OBJETIVOS .....	12
I.3.1. OBJETIVO GENERAL.....	12
I.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	12
I.4. METODOLOGÍA DE TRABAJO .....	13
I.4.1. PLAN DE TRABAJO.....	13
I.5. ESTRUCTURA DE LA TESIS .....	14
CAPÍTULO II – ESTADO DEL ARTE.....	17

II.1. DRENAJE URBANO.....	19
II.1.1. EVOLUCIÓN DE LA GESTIÓN DE LAS AGUAS PLUVIALES .	19
II.1.2. DRENAJE URBANO SUSTENTABLE .....	19
II.2. PAVIMENTOS PERMEABLES .....	21
II.2.1. ANTECEDENTES.....	21
II.2.2. DESCRIPCIÓN .....	24
II.2.3. CLASIFICACIÓN.....	30
II.2.4. VENTAJAS E INCONVENIENTES .....	34
II.2.5. APLICACIONES.....	38
II.3. CARACTERÍSTICAS DE LOS PAVIMENTOS PERMEABLES DE HORMIGÓN POROSO.....	39
CAPÍTULO III – DISEÑO DE PAVIMENTO DE HORMIGÓN POROSO ....	43
III.1. CONSIDERACIONES EN EL DISEÑO DE PAVIMENTOS DE HORMIGONES POROSOS.....	45
III.1.1. CARACTERÍSTICAS DE LA MEZCLA DE HORMIGÓN POROSO.....	45
III.1.2. DISEÑO HIDRÁULICO E HIDROLÓGICO .....	46
III.1.3. DISEÑO ESTRUCTURAL.....	46
III.1.4. RECOMENDACIONES EN FUNCIÓN DE LA APLICACIÓN DEL HORMIGÓN POROSO EN UN PAVIMENTO.....	47
III.2. DISEÑO DE LA MEZCLA DE HORMIGÓN POROSO .....	48
III.2.1. MATERIALES COMPONENTES .....	49
III.2.2. VARIABLES INTERVINIENTES.....	52
III.2.3. DOSIFICACIONES .....	53
III.2.4. PROPIEDADES DEL HORMIGÓN POROSO.....	53
CAPÍTULO IV – DISEÑO DE HORMIGÓN POROSO .....	61

---

IV.1. MEZCLA DE HORMIGÓN POROSO.....	63
IV.1.1. MATERIALES Y DOSIFICACIONES.....	64
IV.1.2. MÉTODOS Y RESULTADOS DE ENSAYO.....	74
IV.2. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	81
IV.2.1. HORMIGÓN EN ESTADO FRESCO.....	81
IV.2.2. HORMIGÓN EN ESTADO ENDURECIDO.....	83
IV.3. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	87
CAPÍTULO V – DISEÑO HIDRÁULICO E HIDROLÓGICO Y DISEÑO ESTRUCTURAL DEL PAVIMENTO.....	89
V.1. INTRODUCCIÓN.....	91
V.2. DISEÑO HIDROLÓGICO E HIDRÁULICO.....	91
V.2.1. PERMEABILIDAD DE LA CAPA DE PAVIMENTO.....	92
V.2.2. VOLUMEN DE ALMACENAMIENTO.....	94
V.2.3. CAPACIDAD DE DRENAJE LONGITUDINAL ADICIONAL.....	97
V.2.4. GESTIÓN DE EVENTOS EXTREMOS DE PRECIPITACIÓN.....	99
V.3. DISEÑO ESTRUCTURAL.....	99
V.4. SECUENCIA CONSTRUCTIVA.....	102
V.4.1. PREPARACION DE BASE Y SUB-BASE.....	102
V.4.2. DOSIFICACIÓN Y MEZCLA.....	102
V.4.3. TRANSPORTE.....	103
V.4.4. COLOCACIÓN Y COMPACTACIÓN.....	104
V.4.5. JUNTAS.....	105
V.4.6. CURADO Y PROTECCIÓN.....	105
V.4.7. APERTURA AL TRÁNSITO.....	106
V.5. CONSERVACIÓN Y MANTENIMIENTO DE PAVIMENTOS PERMEABLES .....	106

CAPÍTULO VI – ESTACIONAMIENTO CON PAVIMENTO PERMEABLE DE HORMIGÓN POROSO.....	109
VI.1. INTRODUCCIÓN .....	111
VI.2. CARACTERÍSTICAS DEL ESTACIONAMIENTO Y DEL PAVIMENTO PERMEABLE.....	111
VI.2.1. LOCALIZACIÓN Y CARACTERÍSTICAS DEL ÁREA EN ESTUDIO.....	111
VI.3. DISEÑO DEL PAVIMENTO PERMEABLE DE HORMIGÓN POROSO. ....	113
VI.4. CARACTERIZACION HIDROLÓGICA E HIDRAULICA.....	116
VI.4.1. CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA .....	117
VI.4.2. CARACTERISTICAS DE LA CUENCA DE APORTE .....	119
VI.4.3. CARACTERISTICAS DEL PAVIMENTO PERMEABLE .....	120
VI.4.4. DREN DE SALIDA.....	121
VI.5. MODELO SWMM 5.1 .....	121
VI.5.1. MODELACIÓN DEL ESTACIONAMIENTO CON SWMM .....	124
VI.6. MODELACIÓN DE UN PAVIMENTO DE HORMIGÓN CONVENCIONAL. 131	
VI.6.1. DIMENSIONADO DE PAVIMENTO DE HORMIGÓN CONVENCIONAL.....	131
VI.6.2. MODELADO DEL PAVIMENTO DE HORMIGÓN CONVENCIONAL.....	135
VI.7. COMPARACIÓN DE LA RESPUESTA DE UN PAVIMENTO DE HORMIGÓN POROSO Y UNO CONVENCIONAL. RESPUESTA DEL PAVIMENTO PERMEABLE PARA EL CLIMA LOCAL .....	139
VI.8. ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	143
CAPÍTULO VII – CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	145
VII.1. HORMIGÓN POROSO .....	147
VII.2. PAVIMENTO PERMEABLE DE HORMIGÓN POROSO.....	148

---

VII.2.1. VENTAJAS .....	150
VII.2.2. INCONVENIENTES .....	150
VII.3. RECOMENDACIONES .....	152
VII.3.1. MEDIDAS PREVENTIVAS: LEGISLACIÓN, FORMACIÓN E INVERSIÓN .....	152
VII.3.2. RECOMENDACIONES DE DISEÑO.....	154
VII.3.3. RECOMENDACIONES DE CONSTRUCCIÓN .....	156
VII.3.4. RECOMENDACIONES DE MANTENIMIENTO .....	158
VII.4. FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACIÓN .....	159
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	163



---

## Lista de Figuras

Figura I-1. Evolución de la población de los países desarrollados y en desarrollo. (Fuente: Bertoni, 2006) .....	8
Figura I-2. Relación entre impermeabilización y aumento del escurrimiento superficial. (Fuente: Stream Corridor Restoration: Principles, Processes and Practice; FISRWG, 2001).....	10
Figura I-3. Impacto Hidrológico de la urbanización: variaciones en el hidrograma. (Fuente: Una revisiones la problemática de las inundaciones urbanas, Bertoni, 2006) .....	10
Figura II-1. Sección tipo de un pavimento permeable. (Fuente: García Haba, 2011) .....	24
Figura II-2. Césped con refuerzo plástico (Izquierda) y con refuerzo de hormigón (derecha) (Fuente: Rodríguez Hernández, 2008 – García Haba, 2011) .....	26
Figura II-3. Adoquines de bloques con ranuras libre. (Fuente: Rodríguez Hernández, 2008).....	27
Figura II-4. Mezcla Bituminosa Porosa. (Fuente: Rodríguez Hernández, 2008) ...	27
Figura II-5. Hormigón Poroso (Fuente: GRACE, 2009) .....	28
Figura II-6. Sub-base de estructura de plástico. (Fuente: Rodríguez Hernández, 2008).....	30
Figura II-7. Infiltración completa al terreno subyacente. (Fuente: García Haba, 2011) .....	33
Figura II-8. Infiltración parcial al terreno subyacente. (Fuente: García Haba, 2011) .....	33
Figura II-9. Sin infiltración al terreno subyacente. (Fuente: García Haba, 2011)...	33
Figura II-10. Hormigón poroso usado como vereda en Olympia, WA, EE.UU. (Fuente: EPA - NPDES, 2009) .....	41
Figura II-11. Calle residencial en Portland, OR, EE.UU. (Fuente: EPA - NPDES, 2009).....	41

Figura III-1. Muestras de hormigón poroso con diferentes contenidos de agua. (a) poca cantidad de agua, (b) cantidad apropiada de agua (c) demasiada cantidad de agua. (Fuente: EPA, 1999) .....	52
Figura III-2. Método de Hand-Squeeze serie K .....	55
Figura III-3. Ensayo de Tronco de cono de Abrams invertido .....	55
Figura IV-1. Granulometría del agregado grueso. (Serie A – F) .....	66
Figura IV-2. Granulometría del agregado fino (Serie B y C) .....	67
Figura IV-3. Granulometría del agregado fino (procedencia local) .....	68
Figura IV-4. Granulometría del agregado fino (Paraná).....	69
Figura IV-5. Secuencia de carga de materiales y homogeneización de la mezcla .....	74
Figura IV-6. Ensayo de Tronco de cono de Abrams invertido para la serie K .....	75
Figura IV-7. Ensayo de asentamiento para la serie K.....	76
Figura IV-8. Evaluación de posible segregación de pasta en la serie K .....	76
Figura IV-9. Resistencia a compresión serie A hasta G (MPa).....	78
Figura IV-10. Resistencia a compresión serie H hasta N (MPa).....	78
Figura IV-11. Resistencia a tracción por flexión a 28 días (MPa) .....	79
Figura IV-12. Porosidad (%) .....	79
Figura IV-13. Equipo para medir permeabilidad .....	80
Figura IV-14. Coeficiente de permeabilidad (cm/seg).....	81
Figura IV-15. Segregación de la pasta probeta serie G.....	84
Figura IV-16. Variación de la permeabilidad según la porosidad del hormigón poroso.....	87
Figura V-1. Proceso de cálculo del factor de seguridad frente a colmatación para un pavimento continuo (azul) y discontinuo (naranja). (Adaptado de M.I.N.V.U., 1996). .....	93
Figura V-2. Permeámetro LCS (derecha) y permeámetro Zarauz (izquierda). ...	107
Figura VI-1. Ubicación del estacionamiento dentro de la UTN-FRC.....	112



---

Figura VI-2. Planta general del área de estacionamiento a diseñar. ....	113
Figura VI-3. Infiltración parcial al terreno subyacente (Fuente: García Haba, 2011) .....	114
Figura VI-4. Sección pavimento permeable de hormigón poroso para estacionamiento .....	115
Figura VI-5. Ubicación del dren en el estacionamiento .....	116
Figura VI-6. Conceptualización de la zona de estudio en SWMM.....	122
Figura VI-7. Esquema conceptual de flujos en un pavimento poroso.....	122
Figura VI-8. Conceptualización de un pavimento poroso en SWMM .....	123
Figura VI-9. Parámetros Horton .....	126
Figura VI-10. Cuenca de aporte en SWMM.....	127
Figura VI-11. Introducción en la modelación de la lluvia de diseño.....	128
Figura VI-12. Parámetros LID para el pavimento permeable en SWMM.....	128
Figura VI-13. Modelación exitosa en SWMM .....	129
Figura VI-14. Balance de agua para el evento de lluvia sobre el pavimento permeable .....	130
Figura VI-15. Espesor de losa de hormigón para pavimento convencional. (ACI Committee 330, 2001).....	133
Figura VI-16. Determinación de k según el tipo de suelo. (Fuente: ICPA, 2014)	134
Figura VI-17. Espesor del pavimento en función de k. (Fuente: ICPA, 2014) .....	135
Figura VI-18. Paquete estructural del pavimento de hormigón convencional para el estacionamiento .....	136
Figura VI-19. Datos de la cuenca de hormigón convencional en la modelación ...	137
Figura VI-20. Resultados del balance de agua sobre el pavimento convencional sobre el estacionamiento .....	138
Figura VI-21. Resultados del balance de agua en un pavimento permeable. ....	139
Figura VI-22. Resultados del balance de agua en un pavimento de hormigón convencional .....	140

Figura VI-23. Valores de escurrimiento e infiltración en el pavimento permeable. .....	140
Figura VI-24. Valores de escurrimiento y precipitación en el pavimento permeable .....	141
Figura VI-25. Valores de escurrimiento e infiltración en el pavimento convencional .....	141
Figura VI-26. Valores de escurrimiento y precipitación en el pavimento convencional.....	142
Figura VI-27. Escurrimiento en el estacionamiento para el pavimento permeable y el pavimento de hormigón convencional.....	143

---

## Lista de Tablas

Tabla I-1. Población urbana y rural en Argentina censada en 1991, 2001 y 2010. (Fuente: Instituto Nacional de Estadísticas y Censo, INDEC) .....	9
Tabla II-1. Capas inferiores de un pavimento permeable y materiales de ejecución. (Fuente: García Haba, 2011).....	29
Tabla III-1. Propiedades típicas del hormigón poroso .....	49
Tabla IV-1. Propiedades ceniza volante.....	65
Tabla IV-2. Propiedades físicas del agregado grueso (Serie A – F).....	65
Tabla IV-3. Propiedades físicas del agregado grueso (Serie G – N). T <sub>máx</sub> = 9,5 mm. ....	66
Tabla IV-4. Propiedades físicas del agregado grueso (Serie G – N). T <sub>máx</sub> = 12,5 mm. ....	66
Tabla IV-5. Propiedades físicas del agregado grueso (Serie G – N). T <sub>máx</sub> = 19,0 mm. ....	67
Tabla IV-6. Propiedades físicas del agregado fino (Serie B y C).....	67
Tabla IV-7. Propiedades físicas del agregado fino (procedencia local).....	68
Tabla IV-8. Propiedades físicas del agregado fino (arena fina Paraná) .....	68
Tabla IV-9. Dosificaciones serie A hasta G (primera y segunda etapa experimental).....	71
Tabla IV-10. Relaciones utilizadas en las dosificaciones (primera y segunda etapa experimental).....	72
Tabla IV-11. Dosificaciones series H hasta N (Tercera etapa experimental) .....	73
Tabla IV-12. Relaciones utilizadas en las dosificaciones (Tercera etapa experimental).....	74
Tabla IV-13. Dimensiones de probetas según ensayo a realizar .....	77
Tabla IV-14. Comparación de la Resistencia a tracción mediante ensayo y correlación con resistencia a compresión .....	86
Tabla V-1. Factores de cambio climáticos (García Haba, 2011) .....	92

Tabla V-2. Mínimos espesores de un pavimento permeable para varias condiciones de tránsito, Adaptado de U.S.EPA1980 (García Haba, 2011). .....	101
Tabla V-3. Espesores mínimos de las capas de un pavimento permeable considerados por M.I.N.V.U. 1996 (García Haba, 2011). .....	102
Tabla VI-1. Intensidades de lluvia para un período de retorno de 5 años.....	118
Tabla VI-2. Dosificación de materiales en kg. para un m <sup>3</sup> de hormigón poroso..	121
Tabla VI-3. Relaciones serie K .....	121
Tabla VI-4. Propiedades en estado endurecido serie K.....	121
Tabla VI-5. Parámetros de la cuenca y del evento hidrológico para pavimento permeable de hormigón poroso .....	125
Tabla VI-6. Parámetros de la cuenca y del evento hidrológico para pavimento convencional de hormigón .....	135

## **CAPÍTULO I – INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS**



## **I.1. INTRODUCCIÓN**

El desarrollo sostenible y su aplicación en la construcción son fundamentales hoy en día en el sector de la ingeniería civil. Dentro de la amplia variedad de procedimientos constructivos que forman parte de la tendencia de construcción sostenible y de los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) más completos se encuentran los pavimentos permeables, los cuales son secciones compuestas de varias capas de materiales de construcción que permiten el paso del agua a través suyo, desde la superficie hasta la base de apoyo, y en conjunto ofrecen la capacidad portante necesaria para resistir un tránsito determinado.

Los sistemas de drenaje sostenible en general, y los pavimentos permeables en particular, son de gran importancia para mejorar la gestión del agua, recurso indispensable para el desarrollo humano. (Rodríguez Hernández, 2008).

### **I.1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA – JUSTIFICACIÓN**

El drenaje urbano es la gestión del agua de lluvia precipitada sobre una determinada zona urbanizada. Sin embargo, en la actualidad y en la mayoría de los casos, el drenaje de las ciudades se limita a mover el agua de lluvia de un lugar a otro sin tener en cuenta el ciclo natural del agua. Esta práctica lleva asociados una serie de problemas entre los que destacan las inundaciones, la contaminación difusa y la pérdida de servicio de los sistemas de saneamiento. (Sañudo Fontaneda, et al., 2012).

Existen distintos tipos de efectos o problemas asociados al agua de lluvia en las ciudades. Por su parte, los principales efectos sobre el medio natural son:

- Fractura completa del ciclo natural del agua en el medio urbano con la desaparición de los principales mecanismos de depuración natural e infiltración al terreno.
- Aumento de la contaminación física, química y térmica en el interior de las ciudades y en los ecosistemas naturales que reciben las aguas procedentes de éstas.

- Aumento de la erosión en los cauces de los ríos con pérdida de ecosistemas de ribera y disminución de la biodiversidad tanto en las ciudades como en los espacios naturales afectados por ellas.

Si tenemos en cuenta que la mala gestión de aguas de lluvia en las ciudades o la ausencia de éstas causan problemas no sólo ambientales sino que repercute en problemas que afectan los tres aspectos que definen el desarrollo sostenible: la economía, el medio ambiente y la sociedad, se puede decir que los principales problemas que se ocasionan son:

- Inundaciones: principal problema desde el punto de vista económico.
- Contaminación difusa: problema asociado con el medio ambiente.
- Falta de servicio: problema que aglutina los efectos sociales.

#### I.1.1.1. Inundaciones

En los últimos años, debido al rápido desarrollo urbano, los sistemas de drenaje urbano que forman parte del sistema de saneamiento de cualquier ciudad se han visto desbordados en tiempo de lluvias debido a la gran cantidad de agua pluvial que reciben. Los volúmenes de aguas pluviales procedentes de zonas urbanas impermeables se suman una y otra vez hasta que llegan a sobrepasar la capacidad de los sistemas de drenajes existentes. Así, los problemas económicos más importantes causados por el agua de lluvia en las ciudades están asociados a su cantidad y a los daños que producen inundaciones, crecidas, desbordamientos, etc.

El aumento de la acción del ser humano sobre el territorio conlleva una alteración hidrogeológica del ciclo natural del agua debida a: la pérdida de cobertura vegetal, la falta de sustrato mineral y la impermeabilización del suelo (Sañudo Fontaneda et al., 2012).

En la ciudad no hay suficiente cobertura vegetal para interceptar la lluvia. Por lo tanto, la precipitación se transforma en su mayor parte en escorrentía superficial que se concentra rápidamente originando grandes caudales. Esta gran cantidad de agua es drenada a través de bocas de tormenta y alcantarillas pasando al sistema de saneamiento. En comparación en las zonas naturales apenas se produce escorrentía subsuperficial debido a los procesos de: infiltración, filtración,



almacenamiento superficial y subterráneo, evapotranspiración y evaporación. Por tanto, en una cuenca urbana el hidrograma de escorrentía de una lluvia dada es totalmente distinto al que se produce en una cuenca natural de similar área. La principal diferencia es el importante caudal punta que se genera en muy poco tiempo debido al mayor porcentaje de superficie impermeable. La gestión de éstos caudales de punta para evitar los daños motiva la construcción de sistemas de drenaje de gran tamaño en las ciudades.

Por tal esta tesis busca contribuir a la gestión de aguas de lluvias aumentando la superficie permeable y por ende disminuyendo el caudal punta del hidrograma de escorrentía superficial a través de la utilización de un material ecológicamente eficiente

## **I.2. GESTIÓN DEL ESCURRIMIENTO PLUVIAL EN MEDIOS URBANOS**

### **I.2.1. DESARROLLO SUSTENTABLE**

El concepto de desarrollo sostenible, sustentable o perdurable nació en 1987 en el documento Nuestro Futuro Común, conocido como Informe Brundtland, fruto de los trabajos de la Comisión de Medio Ambiente y Desarrollo de Naciones Unidas creada en 1983: “El desarrollo sostenible es un desarrollo que satisface las necesidades presentes sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades” (Mulder, 2007). La aplicación de este concepto se asumiría luego con “La agenda 21”, acuerdo internacional firmado entre 170 países para trabajar por un futuro más sustentable (Conferencia de las Naciones Unidas sobre medioambiente y Desarrollo, realizada en Río de Janeiro, Brasil, en Junio de 1992). Posteriormente, en Septiembre de 2000 se reunieron los 189 Estados miembros de las Naciones Unidas en la sede de Nueva York para aprobar la Declaración del Milenio, la misma se traduce en un mapa de ruta estableciendo objetivos a ser alcanzados para el 2015. Los ocho “Objetivos de Desarrollo del Milenio (ODM)” se basan en acuerdos firmados en la década de los 90 en conferencias y cumbres de las Naciones Unidas, y representan el compromiso de todas las naciones por reducir la pobreza y el hambre, disminuir las enfermedades,

la inequidad entre los sexos, enfrentar la falta de educación, la falta de acceso a agua y saneamiento y detener la degradación ambiental.

De los ocho objetivos de Desarrollo del Milenio, el objetivo siete hace referencia específicamente al desarrollo sustentable, esto es “Garantizar la Sostenibilidad del Medio ambiente”. Para lograr este objetivo se establecieron las siguientes metas a alcanzar para el 2015:

- Incorporar los principios del desarrollo sostenible en las políticas y los programas nacionales y reducir la pérdida de recursos del medio ambiente.
- Haber reducido considerablemente la pérdida de diversidad biológica en 2010.
- Reducir a la mitad, para 2015, la proporción de personas sin acceso al agua potable y a servicios básicos de saneamiento.
- Haber mejorado considerablemente, en 2020, la vida de al menos 100 millones de habitantes en barrios marginales.

Dentro de la Declaración del Milenio de las Naciones Unidas en lo que respecta a la “protección del entorno común”, los Estados se comprometen entre otras cosas a “poner fin a la explotación insostenible de recursos hídricos formulando estrategias de ordenación de esos recursos en los planos regional, nacional y local que promuevan un acceso equitativo y un abastecimiento adecuado” e “Intensificar la cooperación con miras a reducir el número y los efectos de los desastres naturales y de los desastres provocados por el hombre”.

En nuestro medio y en la actualidad los municipios enfrentan problemas de sustentabilidad y gestión ambiental, tales como: pobreza; contaminación del aire, el agua y el suelo; el manejo de los desechos sólidos y líquidos; la pérdida de espacios verdes; la gestión de las aguas pluviales y la congestión vehicular entre otros.

Debido a los problemas que enfrentan los estados, ya sea a nivel nacional, regional o local y los objetivos a cumplir en la Declaración del Milenio con respecto a la sustentabilidad ambiental, es importante la gestión integrada de los recursos hídricos en el medio urbano, donde uno de los aspectos relacionados al agua es el manejo del escurrimiento pluvial. Por ello, surge la necesidad de aplicar los principios del desarrollo sustentable al diseño del drenaje urbano, logrando así un “drenaje urbano sostenible”. La filosofía del drenaje urbano sostenible en

comparación con estrategias convencionales, consiste en considerar a las aguas de lluvia como un recurso y no como un problema.

## **I.2.2. URBANIZACIÓN E IMPACTO HIDROLÓGICO**

La explosiva urbanización del mundo y los problemas que trae aparejada esta situación en los grandes conglomerados urbanos constituye una de las temáticas más importantes de nuestro tiempo. La universalización de la urbanización es un fenómeno reciente en la historia del planeta.

En el año 1800 solo el 1% de la población vivía en ciudades. Desde mediados del siglo XVIII, donde se expandiera como efecto asociado a la revolución industrial, la urbanización se ha incrementado a nivel mundial a un ritmo cada vez más acelerado. Lo ocurrido en el siglo XX es un ejemplo de ello.

Según Guglielmo (1996), durante la primera mitad del siglo XX la población total del mundo se incrementó en el 49% y la población urbana en el 240%. En la segunda mitad del siglo esta evolución se aceleró: la población urbana pasó de 1.520 millones de habitantes en 1974 a 1.970 millones en 1982.

Según Tucci (2006), el crecimiento urbano ocurrido en países en desarrollo ha sido significativo desde la década de los 70. En los países desarrollados el crecimiento de la población se estacionó y tiende a disminuir ya que la tasa de natalidad es inferior a 2,1 hijos por matrimonio, manteniéndose así la población estable. La recuperación o el mantenimiento de la población actual ocurren solamente a través de la migración controlada. En los países en desarrollo el crecimiento es aún muy importante y la proyección de Naciones Unidas es que la estabilización de la población ocurrirá solamente en el año 2150 (Figura I-1).

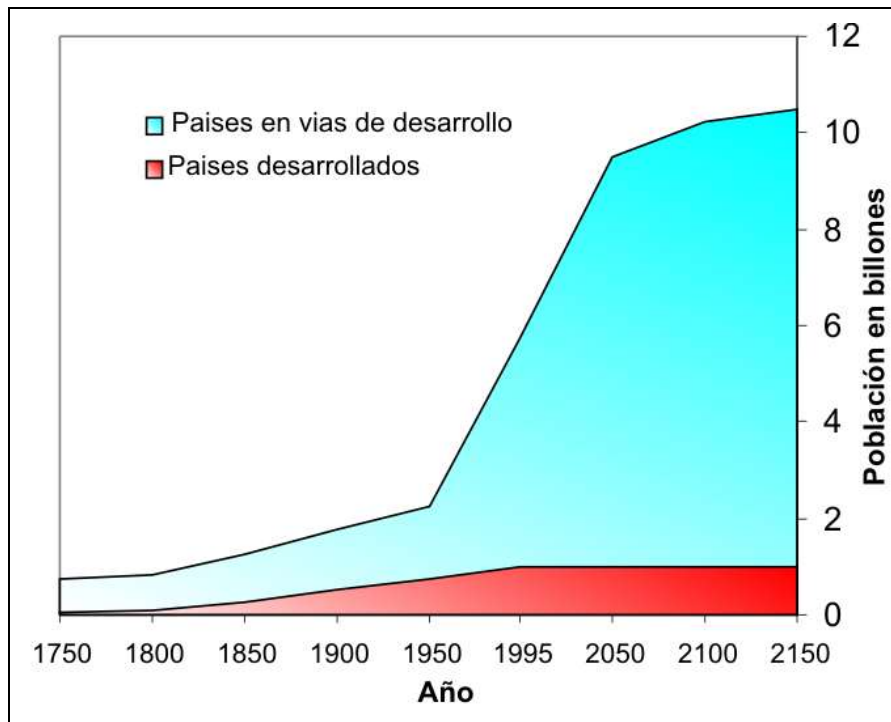


Figura I-1. Evolución de la población de los países desarrollados y en desarrollo. (Fuente: Bertoni, 2006)

En el informe presentado por la ONU “Estado de la Población Mundial 2011” se resalta, entre otros temas, el fenómeno de la migración hacia las ciudades: en promedio, uno de cada dos habitantes del planeta vivía en una ciudad, y se espera que dentro de 35 años la proporción suba a dos de cada tres. El equilibrio entre poblaciones rurales y poblaciones urbanas ha cambiado irreversiblemente hacia la preponderancia de las ciudades. Según datos presentados en el informe, en América latina el 79% de la población vive en ciudades, y se calcula que en 2050 lo hará el 90%.

En Argentina según datos del último censo, 9 de cada 10 habitantes vive en ciudades (91%) (Tabla I-1), más que en países densamente poblados como Estados Unidos (82%), Francia (85%) o Alemania (74%).

Es decir, que lo que se espera para dentro unas décadas en América Latina ya ocurre en Argentina, con una evidente atracción hacia la ciudad de Buenos Aires, pero también a Córdoba, Rosario, Mar del Plata o Resistencia.

Tabla I-1. Población urbana y rural en Argentina censada en 1991, 2001 y 2010. (Fuente: Instituto Nacional de Estadísticas y Censo, INDEC)

<b>Año censo</b>	<b>Urbana (%)</b>	<b>Rural (%)</b>
1991	87	13
2001	89	11
2010	91	9

La marcada concentración urbana en ciudades y el crecimiento acelerado en los últimos años, han generado problemas en el medio ambiente y en la hidrología natural de las ciudades. En las grandes urbes las aguas pluviales se han transformado en un problema, provocando daños por inundaciones aún en condiciones habituales de lluvia.

El desarrollo urbano altera la cobertura vegetal provocando varios efectos que afectan los componentes del ciclo hidrológico natural. Con la impermeabilización del suelo a través de tejados, calles, veredas y patios, el agua que previamente era infiltrada, pasa a escurrir por los conductos de desagüe aumentando el escurrimiento superficial. El volumen que escurría lentamente por la superficie del suelo y quedaba retenido por la plantas, con la urbanización, pasa a escurrir en los canales, exigiendo mayor capacidad de escurrimiento de las secciones. Con la urbanización se reduce la infiltración en el suelo, produciendo una alteración en el ciclo hidrológico. (Figura I-2).

El volumen que deja de ser infiltrado queda en la superficie, aumentando el escurrimiento superficial. Además los conductos pluviales construidos para el escurrimiento superficial, acelera y provoca la reducción del tiempo de concentración y los caudales máximos también aumentan sus picos en el tiempo. El caudal máximo medio de inundación puede aumentar de seis a siete veces (Figura I-3).

Con la reducción de la infiltración, el acuífero tiende a disminuir el nivel de la capa freática por falta de alimentación (principalmente cuando el área urbana es muy extensa), reduciendo así el escurrimiento subterráneo.

Debido a la sustitución de la cobertura natural ocurre una reducción de la evapotranspiración, ya que la superficie urbana no retiene agua como lo hace la cobertura vegetal y no permite la evapotranspiración de los follajes y del suelo (Tucci, 2006).

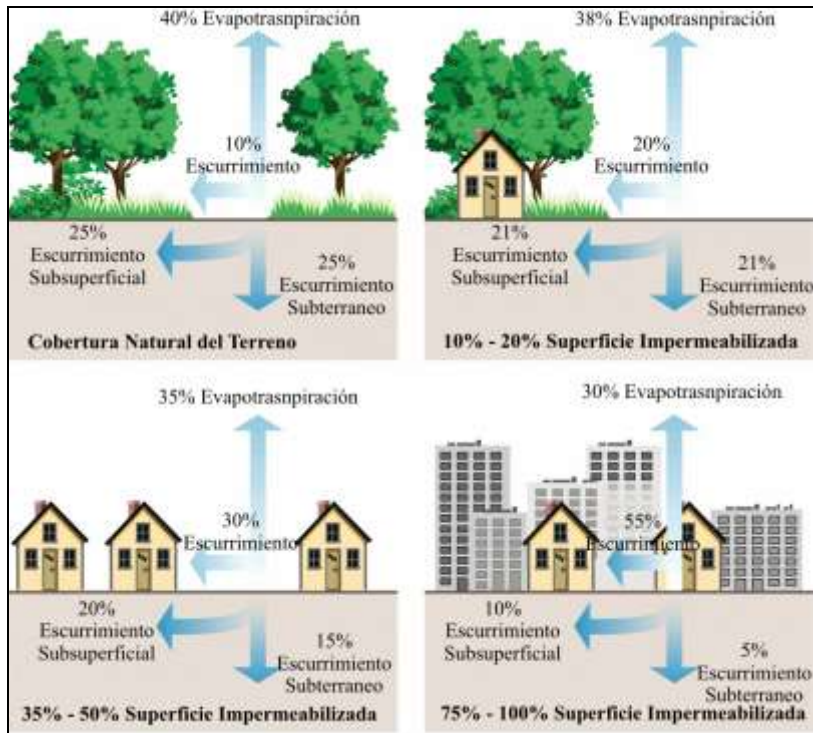


Figura I-2 - Relación entre impermeabilización y aumento del escurrimiento superficial. (Fuente: Stream Corridor Restoration: Principles, Processes and Practice; FISRWG, 2001).

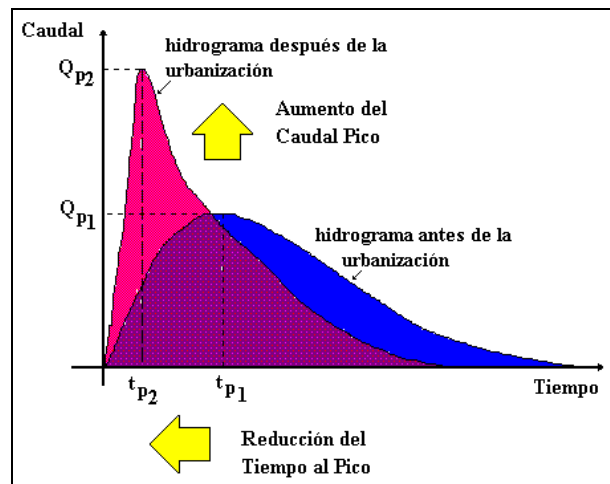


Figura I-3. Impacto Hidrológico de la urbanización: variaciones en el hidrograma. (Fuente: Unas revisiones a la problemática de las inundaciones urbanas, Bertoni, 2006)

Con el desarrollo urbano varios elementos antrópicos que actúan sobre el ambiente son introducidos en la cuenca hidrográfica (impactos cualitativos de la urbanización). Entre los principales Tucci (2006) cita a los siguientes: (a) aumento de la temperatura ambiente; (b) aumento de sedimentos; (c) aumento del material sólido

(basura); (d) decaimiento de la calidad del escurrimiento pluvial y (e) contaminación de acuíferos (Bertoni, 2006).

### I.2.3. INUNDACIONES EN ÁREAS URBANAS

Según Tucci (2006), el escurrimiento pluvial puede producir inundaciones e impactos en áreas urbanas debido a dos procesos que ocurren aisladamente o combinados: inundaciones de áreas ribereñas y/o inundaciones debido a la urbanización. El control del drenaje urbano involucra la gestión del espacio urbano para controlar el impacto de la impermeabilización y evitar la canalización.

- *Inundaciones debido a la urbanización*: son aquellas en que el aumento de su frecuencia y magnitud se debe fundamentalmente al proceso de ocupación del suelo con superficies impermeables y redes de conductos de escurrimiento. Ocurren en áreas localizadas en proximidades de los sectores más bajos de calles y/o avenidas. Estas inundaciones pueden ser constantes u ocasionales.
- *Inundaciones ribereñas*: se asocian a la urbanización indebida de áreas inundables aledañas a los cursos de agua. En general estas inundaciones se asocian a eventos severos. Para comprender este tipo de inundaciones es preciso recordar que el cauce de un curso de agua está compuesto por el lecho menor y el lecho mayor. El lecho menor es aquel ocupado totalmente por el río con un período de retorno que oscila entre 2 y 5 años. Tal condición se denomina de “márgenes llenas”. La crecida máxima anual (u ordinaria) es contenida totalmente por el lecho menor. El lecho mayor de los ríos es ocupado por las aguas con una recurrencia (o tiempo de retorno) mayor, hecho que anima a la ocupación de dichas tierras.

Las razones por las que ocurren las inundaciones ribereñas son: falta de restricciones municipales sobre el loteo de áreas con alto riesgo inundación; secuencias de años relativamente secos, que provocan el “olvido” de empresarios, autoridades y población en general; falta de alternativas de la población de baja renta para acceder a lotes relativamente baratos; ocupación supuestamente temporaria (y/o invasión) por parte de la población más carenciada por tratarse de áreas pertenecientes al poder público o despreciadas por el sector privado.

### **I.3. OBJETIVOS**

#### **I.3.1. OBJETIVO GENERAL**

Contribuir al control del escurrimiento pluvial en áreas urbanas a través del diseño y elaboración de hormigones porosos con materiales locales evaluando su capacidad de infiltración.

#### **I.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Caracterizar y seleccionar los agregados locales de peso normal, cementos, aditivos y adiciones, más apropiados para asegurar la adecuada permeabilidad y durabilidad de los hormigones.
- Optimizar el método de dosificación considerando el elevado porcentaje de vacíos y las particularidades de los hormigones porosos.
- Encontrar una dosificación adecuada para la elaboración de hormigón poroso con materiales locales
- Determinar las propiedades físico-mecánicas del hormigón poroso endurecido.
- Comparar la capacidad de infiltración del hormigón poroso en relación al hormigón convencional (impermeable) ante un evento de lluvia en un pavimento de un estacionamiento.
- Estimar la posible reducción de esorrentía pluvial en un área urbana en función de la capacidad de infiltración del hormigón poroso obtenida en laboratorio y la incidencia de la infiltración de las aguas de lluvia en la gestión de las inundaciones urbanas.
- Transferir los resultados obtenidos en la investigación a Municipios, Comunas, Empresa de hormigón elaborado, Instituciones Educativas, Cátedras, Congresos, contribuyendo desde la ingeniería a la gestión de inundaciones urbanas y prácticas ambientales sustentables.



## **I.4. METODOLOGÍA DE TRABAJO**

El estudio teórico-experimental propone avanzar en el diseño y conocimiento de los pavimentos permeables de hormigón poroso como alternativa de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) y sus ventajas medioambientales.

Se incluye un estudio teórico del estado del arte de pavimentos permeables a nivel mundial y particularmente su desarrollo a nivel local.

Se aborda el estudio de pavimentos permeables de hormigón poroso, dando fundamentalmente importancia al hormigón poroso como material, y a las ventajas de éste dentro de un pavimento permeable para controlar la escorrentía urbana ante eventos de lluvia.

Se desarrolla en laboratorio un hormigón poroso con materiales locales que pueda ser elaborado a mayor escala para aplicarlo en un estacionamiento vehicular. Se busca alcanzar todos los parámetros técnicos que definen un hormigón poroso y que lo hacen apto para capa de rodamiento de un estacionamiento de bajo tránsito como parte de un paquete estructural de pavimento permeable.

Se modelaron dos tipos de pavimentos, uno de pavimento permeable con el hormigón poroso desarrollado y otro de pavimento rígido de hormigón convencional, con el objeto de evaluar el comportamiento de ambos ante una lluvia de diseño con una frecuencia y tiempo de duración típico para la zona de emplazamiento del estacionamiento. El modelado se realiza con el programa SWMM de EPA de código abierto y con un módulo LID (Low Impact Development) para este tipo de pavimentos. El objeto de la modelación es evaluar el comportamiento de la escorrentía urbana cuando se produce en un suelo permeable y en uno impermeable.

### **I.4.1. PLAN DE TRABAJO**

El plan de trabajo contempla las siguientes actividades:

1. Estudio bibliográfico del estado del arte sobre pavimentos permeables y Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible mediante pavimento de hormigón poroso.

2. Desarrollo de hormigón poroso con materiales locales. Selección de materiales y caracterización. Caracterización técnico mecánica del hormigón poroso.

3. Estudio de un caso de aplicación, un estacionamiento vehicular de bajo tránsito con hormigón poroso como pavimento permeable. Diseño hidráulico e hidrológico y diseño estructural del pavimento.

4. Estudio del programa SWMM que es un modelo dinámico de simulación de lluvia-escorrentía utilizado para la simulación de eventos únicos o de largo plazo (continua) de la cantidad y calidad de escorrentía de áreas principalmente urbanas.

5. Modelación de un pavimento permeable de hormigón poroso con SWMM 5.1

6. Modelación de un pavimento convencional de hormigón con SWMM 5.1

7. Análisis y comparación de resultados de las modelaciones. Beneficios medioambientales.

8. Análisis y conclusiones. Recomendaciones para el diseño y uso de pavimentos permeables de hormigón poroso.

9. Redacción. Escritura de tesis.

## **I.5. ESTRUCTURA DE LA TESIS**

La tesis se estructura en siete capítulos. Se presenta una introducción a la problemática que le dio origen a esta tesis, el estado del arte, la importancia del tratamiento del escurrimiento pluvial en medios urbanos, la posibilidad de tratamiento con pavimentos permeables, el hormigón poroso, la cuantificación del drenaje de agua de lluvias con pavimentos impermeables y con pavimento de hormigón poroso, el estudio de caso con la aplicación en una playa de estacionamiento, las conclusiones y las recomendaciones.

Capítulo I - Introducción y objetivos: En este capítulo se introduce sobre la problemática de las aguas de escurrimiento pluvial en medios urbanos. Se plantea un enfoque de la gestión de las mismas a través de un desarrollo sustentable como

solución a los problemas de inundaciones en áreas urbanas. Se presentan los objetivos generales y particulares de la investigación y el alcance de la misma.

Capítulo II - Estado del arte: Se presenta la importancia del estudio del drenaje urbano y la evolución de la gestión de las aguas de lluvias. Los pavimentos permeables como drenajes sustentables. Descripción. Clasificación. Ventajas e inconvenientes. Y aplicaciones de los pavimentos permeables.

Capítulo III - Diseño de pavimento de hormigón poroso: El capítulo trata de las consideraciones a tener en cuenta en el diseño de un pavimento permeable de hormigón poroso. Las características de las mezclas de hormigón poroso. El diseño hidráulico e hidrológico. El diseño estructural.

Capítulo IV - Diseño de hormigón poroso. Aborda el diseño de la mezcla de hormigón poroso. La elección de los materiales componentes y su dosificación. Las mezclas resultantes y los resultados de los ensayos en estado fresco y endurecido.

Capítulo V - Diseño hidráulico e hidrológico y diseño estructural: Se presentan las características técnicas que debe cumplir el hormigón poroso en el sistema de pavimento permeable para soportar las cargas de tránsito previsto y contribuir a la correcta gestión de las aguas pluviales.

Capítulo VI - Estacionamiento con pavimento permeable de hormigón poroso: Este capítulo presenta la aplicación del hormigón poroso diseñado como parte de un pavimento permeable para un estacionamiento vehicular en dependencias de la Facultad Regional Córdoba de la Universidad Tecnológica Nacional. Se presenta el modelado del pavimento permeable ante un evento de lluvia con el programa SWMM 5.1. También se diseña el pavimento del estacionamiento de la Facultad con hormigón convencional y se modela con SWMM 5.1 su comportamiento hidrológico. Finalmente se comparan ambas respuestas hidrológicas de la misma cuenca del estacionamiento ante el mismo evento de lluvia y se realiza el análisis de resultados.

Capítulo VII - Conclusiones y recomendaciones. En este capítulo se aborda las principales conclusiones de implementar un sistema de gestión de aguas urbanas como el pavimento permeable de hormigón poroso. Sus ventajas e inconvenientes; así como las recomendaciones para la construcción y mantenimiento de estos sistemas.

Al final de la tesis se presentan las referencias bibliográficas citadas y consultadas.

## **CAPÍTULO II – ESTADO DEL ARTE**



## **II.1. DRENAJE URBANO**

### **II.1.1. EVOLUCIÓN DE LA GESTIÓN DE LAS AGUAS PLUVIALES**

En su concepción tradicional el saneamiento urbano es considerado como el conjunto de acciones que objetivan la evacuación rápida de las aguas pluviales y de los desechos industriales y domésticos. Esta visión de la circulación del agua urbana no es más aceptable en una época donde se proponen acciones respetando el medio ambiente.

La filosofía básica del manejo del agua pluvial en residencias y toda clase de urbanización, está abierta actualmente a discusión y revisión. Las anteriores filosofías establecían simplemente la conveniencia de actuar en un sitio con la máxima rapidez posible para eliminar el exceso de escurrimiento pluvial. El efecto de las técnicas basadas en estas filosofías ha sido una de las principales causas del incremento de la frecuencia con que se verifican inundaciones aguas abajo.

El proceso de manejo del escurrimiento pluvial está actualmente sufriendo un significativo redireccionamiento, que hasta puede ser considerado una verdadera revolución. Esto está evidenciado por un nuevo énfasis en el deseo de detener o almacenar temporariamente una parte de la lluvia donde ella cae (Bertoni, 2006).

### **II.1.2. DRENAJE URBANO SUSTENTABLE**

Dentro de los principios básicos de control del escurrimiento pluvial, encontramos criterios sustentables, tales como: (a) El escurrimiento natural no debe ser ampliado por los que ocupan la cuenca, sea a través de un simple loteo o en obras existentes en el ambiente urbano. Esto se aplica a un simple relleno urbano, la construcción de puentes, autopistas, y fundamentalmente, la impermeabilización de las nuevas urbanizaciones. El principio es que cada usuario urbano, no debe ampliar la crecida natural, (b) las ocupaciones del espacio urbano y el drenaje de las aguas pluviales deben priorizar los mecanismos naturales de escurrimiento como puede ser la infiltración.

Las medidas de control del escurrimiento pueden ser clasificadas de acuerdo con su acción sobre la cuenca hidrográfica de la siguiente manera:

- Distribuida o en la fuente: es el tipo de control que actúa sobre el lote, plazas y paseos públicos.
- En el microdrenaje: es el control que acciona sobre el hidrograma resultante de uno o más urbanizaciones.
- En el macrodrenaje: es el control sobre los principales cursos de agua urbanos. (Tucci, 2006).

Las medidas de control pueden ser organizadas de acuerdo con su acción sobre el hidrograma en cada una de las partes de las cuencas mencionadas anteriormente, de la siguiente manera:

- Infiltración y percolación: normalmente, crea espacio para que el agua tenga mayor infiltración y percolación en el suelo, utilizando el almacenamiento y el flujo subterráneo para retardar el escurrimiento superficial.
- Almacenamiento: a través de reservorios que pueden ocupar espacios abiertos o cerrados. El efecto del reservorio es de retener parte del volumen del escurrimiento superficial, reduciendo su pico y distribuyendo el caudal en el tiempo.
- Aumento de la eficiencia del escurrimiento: a través de conductos y canales, drenando áreas inundadas. Este tipo de solución tiende a transferir crecidas de un área hacia otra, pero puede ser benéfico cuando se utiliza en conjunto con reservorios de retención.
- Diques y estaciones de bombeo: solución tradicional de control localizado de crecidas en áreas urbanas que no poseen espacio para amortiguamiento de la inundación. (Tucci, 2006)

Esta tesis estudia particularmente las medidas de control localizadas en lotes, estacionamientos, parques y paseos públicos denominadas de control en la fuente. Las principales medidas son las siguientes:

- El aumento de áreas de infiltración y percolación;
- El almacenamiento temporario en reservorios residenciales o tejados.



A continuación se mencionan los tipos de dispositivos que pueden ser utilizados:

- Infiltración y percolación: dentro de estos se encuentran las superficies de infiltración, trincheras de infiltración, cuencas de percolación, dispositivos hidráulicos permeables y pavimentos permeables.
- Almacenamiento: el almacenamiento puede ser efectuado en tejados, en pequeños reservorios residenciales, en estacionamientos, en área deportivas, entre otros.

De los tipos de dispositivos que pueden ser utilizados para el control del escurrimiento pluvial, se ha seleccionado estudiar en esta tesis el pavimento permeable realizado con hormigón poroso. Generalmente el uso de pavimentos permeables se reduce a paseos públicos, estacionamientos, predios deportivos y calles de poco tránsito. En calles muy transitadas pueden sufrir deformaciones importantes obstruyéndose sus poros, volviéndose impermeables.

Los dispositivos de control “en la fuente” son una alternativa opuesta a los clásicos diseños sanitaristas que contemplan como única solución la implementación de conductos que retiran rápidamente el flujo hacia aguas abajo. La gran dificultad de implementación de este tipo de control en la fuente reside en:

- La resistencia de profesionales a implementar nuevas tecnologías.
- Similar inercia se observa en los organismos encargados tanto de proyectar nuevas obras como los que fiscalizan y controlan.
- Falta de tratamiento de efluentes y de un sistema eficiente de limpieza urbana. (Bertoni, 2006).

## **II.2. PAVIMENTOS PERMEABLES**

### **II.2.1. ANTECEDENTES**

Los pavimentos permeables son un subconjunto importante y ampliamente estudiado dentro de los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) o BMPs (Best Management Practices o Buenas Prácticas Ambientales) (Pratt et al., 2002).

En particular, los pavimentos permeables entran dentro de la categoría de sistemas de infiltración o de control en origen de la escorrentía superficial, siendo un tipo específico de superficies permeables. Además, los pavimentos permeables pueden considerarse como una cadena de drenaje sustentable completa por sí mismos, pues proporcionan infiltración, captación, transporte y almacenamiento, al permitir controlar en origen la escorrentía superficial, laminando los flujos de aguas pluviales y ofreciendo además un servicio a la sociedad como pavimentos estéticos, cómodos y seguros (Rodríguez Hernández, 2008).

Los Estados Unidos fueron los pioneros en abrir el camino hacia el estudio y elaboración de guías de diseño sobre superficies permeables (U.S.EPA, 1980; Schueler, 1987; Smith, 2000, Pratt, 2004). Fue a partir de los años '80 cuando se trataron aspectos de calidad del agua en los pavimentos permeables (Day et al., 1981). La utilización de pavimentos permeables tuvo la intención de aliviar la contaminación debida a los vertidos de los sistemas de saneamiento unitarios en tiempos de lluvia, reduciendo además los parámetros de diseño de las infraestructuras de drenaje urbano (Rodríguez Hernández, 2008). Son ejemplo de manuales que se utilizan hoy en día, el "Virginia DCR Stormwater Design Specification N° 7" en el estado de Virginia, el "NYC Green Infraestructura Plan" en Nueva York.

En Chile, el Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU) publicó la guía de diseño "Técnicas Alternativas para Soluciones de Aguas Lluvias en Sectores Urbanos". El trabajo fue desarrollado por la Dirección de Investigaciones Científicas y Tecnológicas (DICTUC) a través del Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental de la Escuela de Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica de Chile, e incluye a los pavimentos permeables entre otras técnicas de SUDS (García Haba, 2011). Si bien no existe en Chile un uso extendido de estos pavimentos, en el año 2003 se realizó una instalación piloto de pavimentos permeables para evaluar su comportamiento como solución de aguas de lluvia. La instalación está ubicada en el campus San Joaquín de la Universidad Católica de Chile y corresponde a 4 sitios de estacionamiento dotados de un sistema de monitoreo de lluvias y caudales (Rivera et al., 2003a).

En Brasil, Acioli *et al.* (2004) recogen el proceso de ejecución y monitorización de un estacionamiento experimental de 280 m<sup>2</sup> con dos tipos de pavimentos

permeables: mezcla bituminosa porosa y césped reforzado con prefabricados de hormigón. Los primeros resultados obtenidos en este estacionamiento quedan recogidos por Acioli *et al.* (2005) (Rodríguez Hernández, 2008).

Recientemente, en Australia y Nueva Zelanda se destacan los trabajos de investigación desarrollados por las Universidades de South Australia y de Auckland, en los que se estudia la funcionalidad de los pavimentos permeables. Como manuales o guías de diseño cabe citar el “Urban Stormwater: Best Practice Environmental Management Guidelines” y el “Water Sensitive Urban Design Technical Guidelines for Western Sydney”.

Ya en Europa, y concretamente en el Reino Unido, es donde se concentra el mayor número de publicaciones referentes a los pavimentos porosos, destacando a las Universidades de Coventry (Inglaterra) y Abertay-Dundee (Escocia), como los principales referentes. Pratt *et al.*, (2002) elaboraron un manual para la asociación de la construcción CIRIA, enfocado íntegramente en la concepción de sistemas de pavimentos permeables. Entre las publicaciones de CIRIA destaca “The SUDS manual”, muy empleado incluso fuera de las fronteras británicas.

En Irlanda, McBride y Knapton (2006), defienden el uso de pavimentos permeables para cumplir con los requerimientos de las autoridades locales de que cualquier nuevo desarrollo no añada caudales adicionales al sistema de drenaje urbano, manteniendo los niveles de permeabilidad previos al desarrollo (Rodríguez Hernández, 2008). Como publicación referente a reglas, políticas o estándares aplicables en materia de los pavimentos permeables destaca “Greater Dublin Strategic Drainage Study. Regional Drainage Policies”.

En Alemania, los pavimentos permeables han venido utilizándose desde los años 70. Hoy en día, el control de la contaminación del agua es el principal aspecto estudiado, y su construcción se encuentra regulada (Rodríguez Hernández, 2008). Como reglas, políticas o estándares aplicables destaca el “Planning, Construction and Operation of Facilities for the Percolation of the Precipitation Water”.

En Francia, alrededor de los años 80, las autovías comenzaban a construirse con una sub-base granular que permitía el drenaje interno de las aguas. A estas estructuras se les denominó “estructuras embalse”, y contaban tanto con pavimentos de asfalto impermeable, como de asfalto poroso (Raimbault, 1990; 1993a and

1993b, Pratt, 2004). En 1994 se publicó el documento “Techniques alternatives en assainissement pluvial: Choix, conception, réalisation et entretien” como guía de las nuevas técnicas alternativas de drenaje urbano (García Haba, 2011).

Del análisis bibliográfico resulta que a nivel mundial hay estudios y guías específicas de recomendaciones sobre el diseño y construcción de pavimentos permeables. Sin embargo, en Argentina no existen actualmente manuales ni recomendaciones sobre la aplicación de este tipo de técnicas de construcción como aporte al drenaje urbano sustentable.

## II.2.2. DESCRIPCIÓN

Como se explicó anteriormente, los pavimentos permeables se encuentran dentro de las técnicas de drenaje urbano sustentable, cuyo objetivo principal es el fomento de la retención y la infiltración de las escorrentías en el origen del sistema. Pueden utilizarse como alternativa a los pavimentos impermeables tradicionales, reduciendo el volumen y la velocidad de la escorrentía, y mejorando su calidad.

Desde el punto de vista del drenaje urbano sostenible, los pavimentos permeables se conceptualizan según la sección tipo de la Figura II-1, compuesta por varias capas de materiales permeables. Individualmente las capas actúan de modo multifuncional, mientras que en conjunto, ofrecen la capacidad portante necesaria para resistir un tránsito determinado (Rodríguez Hernández, 2008).

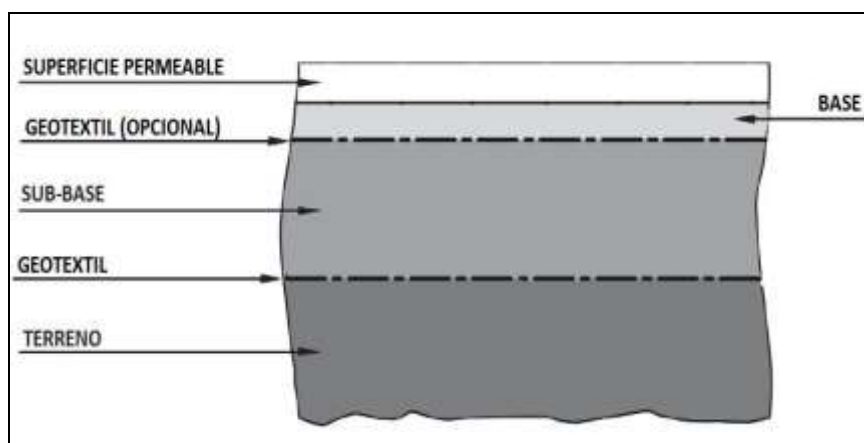


Figura II-1. Sección tipo de un pavimento permeable. (Fuente: García Haba, 2011)

Desde el punto de vista cuantitativo, los procesos que generalmente se dan en las capas de un pavimento permeable son los siguientes:

- Infiltración/Percolación. (Entendiendo por percolación, como la infiltración a través de la superficie permeable).
- Retención.
- Transporte.
- Almacenamiento.

Desde el punto de vista cualitativo, los tratamientos físicos, químicos y biológicos que ocurren en las capas son (Woods-Ballard et al., 2007):

- Filtración.
- Adsorción.
- Biodegradación.
- Sedimentación.

La configuración y la naturaleza de los materiales de las capas pueden presentar variantes, pero siempre bajo la condición de permeabilidad creciente desde las capas superiores hacia las inferiores. A partir de la sección tipo de la Figura II -1, las capas que conforman el sistema pueden agruparse en:

- Superficie permeable.
- Capas inferiores

#### II.2.2.1. SUPERFICIES PERMEABLES

Se entiende por superficie permeable al pavimento artificial que permite a través de sí el paso del agua (Castro et al., 2005). Las superficies permeables pueden presentarse de diferentes maneras, permitiendo la infiltración de las aguas pluviales sirviendo como primer filtro, a la vez que actúan como soporte estructural. A grandes rasgos, las tipologías de pavimentos permeables que se pueden encontrar hoy son las siguientes:

- Césped o grava con refuerzos: los refuerzos empleados para permitir el tránsito ligero sobre el césped o la grava pueden ser de hormigón o plástico. Los refuerzos de hormigón ofrecen una mayor resistencia a los esfuerzos tangenciales originados por el tránsito frenando, acelerando y maniobrando, mientras que los refuerzos de plástico permiten un mejor desarrollo de las raíces del césped que protegen (Figura II-2).
- Adoquines con ranuras: son bloques prefabricados de hormigón diseñados o dispuestos de forma que la superficie final disponga de canales para la infiltración vertical del agua. Estos canales pueden rellenarse con material drenante o dejarse libres (Figura II-3).
- Bloques porosos: adoquines porosos se encuentran actualmente en desuso debido a su alto costo de producción, siendo sustituidos actualmente por soluciones más baratas como los pavimentos continuos de hormigón poroso impreso, los cuales ofrecen acabados de estética semejante (Ecocreto, 2007).
- Mezcla bituminosa porosa: las mezclas bituminosas se consideran porosas o drenantes cuando el porcentaje de huecos es mayor al 20% (Figura II-4)
- Hormigón poroso: para que sea considerados porosos, deben tener un mínimo de 15% de huecos, sin sobrepasar el 25% para evitar problemas de estabilidad (Figura II-5) (Rodríguez Hernández, 2008).



Figura II-2. Césped con refuerzo plástico (Izquierda) y con refuerzo de hormigón (derecha). (Fuente: Rodríguez Hernández, 2008 – García Haba, 2011)



Figura II-3. Adoquines de bloques con ranuras libre. (Fuente: Rodríguez Hernández, 2008)



Figura II-4. Mezcla Bituminosa Porosa. (Fuente: Rodríguez Hernández, 2008)





Figura II-5. Hormigón Poroso. (Fuente: GRACE, 2009)

#### II.2.2.2. CAPAS INFERIORES

Para completar la estructura de un pavimento permeable, debe contemplarse el siguiente conjunto de capas:

- Base
- Sub-base.
- Geotextil.

En función de la naturaleza de los materiales de estas capas, se pueden catalogar en (Rodríguez Hernández, 2008):

- Capas granulares.
- Estructuras de plástico.
- Geosintéticos.

Con el fin de sintetizar las clasificaciones anteriores, se presenta la Tabla II.1. En ella se recoge la tipología de capas inferiores en función de los materiales en que se pueden ejecutar y/o combinar.



Tabla II-1. Capas inferiores de un pavimento permeable y materiales de ejecución..  
(Fuente: García Haba, 2011)

Capa	Material
Base	Granular
Sub-base	Granular / Estructura de plástico / Geosintéticos
Geotextil	Geosintéticos

La base consiste en una capa de material granular (de un determinado tipo de árido y granulometría fija) que actúa a modo de cama de asiento para el pavimento. Además, participa en la mejora de la calidad de la escorrentía mediante el proceso de filtrado y las altas actividades biológicas que se producen en su interior (GCPSP, 2005; García Haba, 2011).

La sub-base es una capa de material granular, encargada de almacenar y retener en sus huecos el volumen de escorrentía, para posteriormente, infiltrarlo en el terreno natural o hacia los laterales del firme. Es por tanto responsable de resolver los problemas de cantidad. Del mismo modo que ocurre en la base, también ayuda a mejorar la calidad del agua escurrida mediante el proceso de filtrado y las altas actividades biológicas que se producen en su interior (GCPSP, 2005). Además ofrece soporte estructural, necesario para soportar las cargas de tránsito (García Haba, 2011)

Es posible combinar el material granular con geosintéticos del tipo geomallas de refuerzo y/o geomembranas impermeables. Las geomallas se colocan en la sub-base con el fin de incrementar su trabazón y mejorar las características resistentes del sistema. Las geomembranas impermeables se utilizan en casos donde no es posible la infiltración al terreno y/o quiere aprovecharse el agua para algún uso. Se colocan entre la sub-base y el terreno natural para evitar el paso del agua creando un volumen estanco, permitiendo el almacenamiento del agua infiltrada (Rodríguez Hernández, 2008).

Otra opción es reemplazar o combinar el material granular de la sub-base mediante estructuras de plástico, como los depósitos modulares. Por un lado, los depósitos modulares proporcionan una mayor capacidad de almacenamiento en detrimento de la capacidad de tratamiento, pues tienen un mayor porcentaje de huecos que el material granular (>90% en estructuras de plástico frente al 40% del material granular) (figura II-6) (García Haba, 2011).



Figura II-6. Sub-base de estructura de plástico. (Fuente: Rodríguez Hernández, 2008)

Respecto al geotextil, este juega un papel importantísimo en el funcionamiento del sistema. En la sección de un pavimento permeable se coloca normalmente entre la base y la sub-base, y entre la sub-base y el terreno natural. Las funciones principales de un geotextil son de filtro y separación, por lo que deben tener una abertura de poro y una permeabilidad adecuadas, sin embargo, aquellos colocados sobre la sub-base, proporcionan además refuerzo estructural al sistema frente a las tensiones horizontales producidas por el tránsito de vehículos. Dadas las características de este geosintéticos, es el principal responsable de la depuración del agua, reteniendo y biodegradando contaminantes como hidrocarburos y aceites (García Haba, 2011).

### **II.2.3. CLASIFICACIÓN**

#### **II.2.3.1. SEGÚN LA TIPOLOGÍA DEL PAVIMENTO**

En el Reino Unido, Woods-Ballard et al. (2007) distinguen los siguientes tipos:

Pavimentos porosos: Son aquellos que filtran el agua a través de la totalidad de su superficie. Abarcan las superficies de grava, hormigón poroso o asfalto poroso.

Pavimentos permeables (propriadamente dichos): Están formados por materiales altamente impermeables combinados con ranuras o materiales permeables. De modo que el agua percola por las discontinuidades y a través de los materiales permeables hacia las capas inferiores del pavimento. Abarcan los pavimentos del tipo césped o grava con refuerzos, y adoquines con ranuras.

En Estados Unidos, Ferguson (2005), distingue nueve tipos de pavimentos permeables:

- Áridos porosos.
- Césped poroso.
- Celdas de plástico.
- Adoquines con juntas abiertas.
- Entramados prefabricados de hormigón.
- Hormigón poroso.
- Asfalto poroso.
- Superficies permeables ligeras.
- Caminos de madera.

En Nueva Zelanda, la clasificación según Hartwell et al. (2004), divide los pavimentos permeables en:

- *Bloques fabricados con material impermeable.* Incluyen el césped reforzado y entramados prefabricados de hormigón con juntas o huecos.
- *Bloques fabricados con material poroso.* En este caso abarca los bloques porosos con huecos y superficies granulares.

Por su parte, Rodríguez Hernández (2008), realiza una clasificación en dos categorías fundamentales, claramente diferenciadas:

Pavimentos permeables con pavimentos permeables discontinuos: formados por elementos o materiales impermeables que, combinados o no con materiales porosos, permiten la infiltración del agua a través de huecos, espacios o ranuras de

la superficie, asegurando una adecuada capacidad portante. Se incluyen: césped poroso o grava con refuerzos, y adoquines con ranuras o juntas abiertas.

Pavimentos permeables con pavimentos permeables continuos: formados únicamente por materiales porosos que permiten la infiltración del agua a través de toda la superficie por igual, asegurando una adecuada capacidad portante. Se incluyen: Mezclas bituminosas porosas y hormigones porosos (García Haba, 2011).

### II.2.3.2. SEGÚN EL DESTINO DE LAS AGUAS FILTRADAS

En el Reino Unido, Woods-Ballard et al. (2007) proponen la siguiente clasificación:

Infiltración completa al terreno subyacente (Figura II-7). Cuando la capacidad de infiltración del terreno es lo suficientemente grande, se puede diseñar el pavimento permeable para que el agua infiltre en su totalidad hacia el mismo.

Infiltración parcial al terreno subyacente (Figura II-8). Cuando la capacidad de infiltración del terreno es escasa o limitada, se completa la infraestructura con drenes longitudinales en las capas inferiores que evacuan el exceso hacia la red convencional.

Sin infiltración al terreno subyacente (Figura II-9). Cuando el terreno subyacente es impermeable o se encuentra impermeabilizado mediante geomembranas, el sistema debe contar necesariamente con drenes longitudinales en las capas inferiores que evacuan el agua almacenada hacia la red convencional. Esta alternativa se utiliza cuando la permeabilidad del subsuelo es muy baja (por ejemplo, en terrenos arcillosos), cuando se quiere aprovechar el agua filtrada (en este caso la salida es hacia la red de aprovechamiento), cuando el terreno subyacente es especialmente sensible incluso a las aguas filtradas, o cuando el nivel freático no se encuentra a más de un metro de profundidad de la superficie del pavimento.

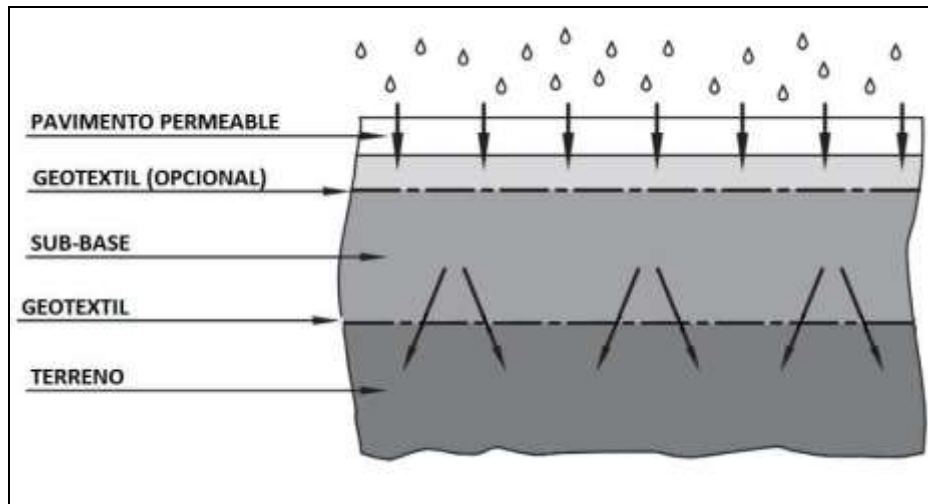


Figura II-7 – Infiltración completa al terreno subyacente  
(Fuente: García Haba, 2011)

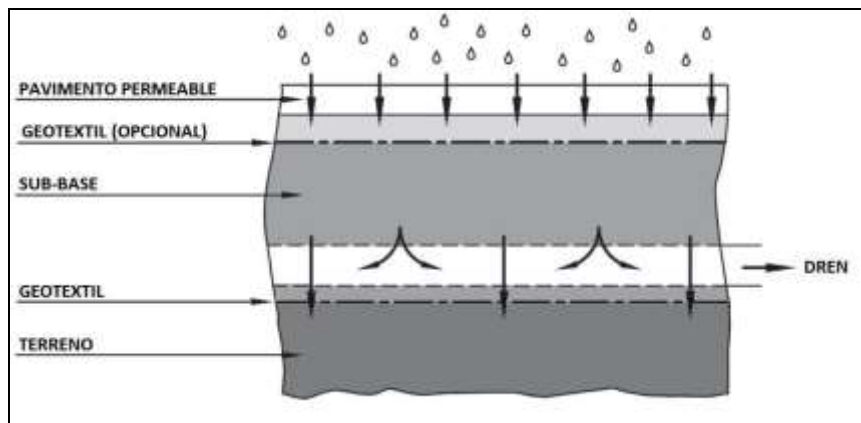


Figura II-8 – Infiltración parcial al terreno subyacente  
(Fuente: García Haba, 2011)

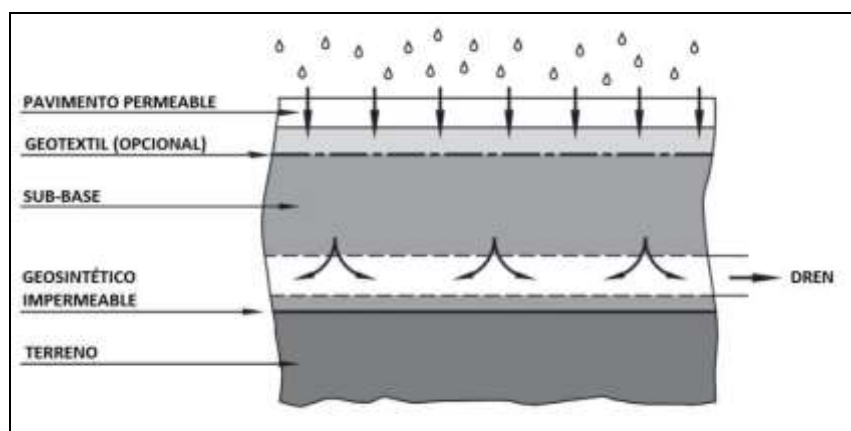


Figura II-9 – Sin infiltración al terreno subyacente  
(Fuente: García Haba, 2011)

En España, Rodríguez Hernández (2008), propone una clasificación que distingue tres tipos de pavimentos permeables:

**Pavimentos permeables con infiltración.** Son aquellos que permiten la infiltración al terreno del agua infiltrada y filtrada a través de todas las capas permeables del firme, incluida la explanada, con el objetivo de permitir la recarga de las reservas naturales de aguas subterráneas.

**Pavimentos permeables con almacenamiento.** Son aquellos que están diseñados y construidos para permitir el almacenamiento de un determinado volumen de agua en la sub-base, con el objetivo de su posterior valorización mediante su reutilización en usos no potables.

**Pavimentos permeables con drenaje diferido.** Son aquellos que cuentan con un sistema de drenaje subterráneo compuesto por tuberías permeables, con el objetivo de retardar el flujo de aguas pluviales, laminando las puntas de caudal en los sistemas de saneamiento a los que están conectados (García Haba, 2011).

## **II.2.4. VENTAJAS E INCONVENIENTES**

### **II.2.4.1. VENTAJAS**

Rodríguez Hernández (2008) expuso las ventajas ofrecidas por los pavimentos permeables según la visión de distintos autores.

Para Grover et al. (1972) las principales ventajas de los pavimentos permeables son:

- Minimización de desbordes en sistemas de saneamiento unitarios.
- Aumento de las reservas de agua.
- Mejora de la seguridad del tránsito.
- Preservación de la vegetación.
- Laminación de inundaciones.
- Obtención de beneficios estéticos.

Según Ferguson (2005) los pavimentos permeables prometen:

- Agua limpia.
- Mayor esperanza de vida para los árboles.
- Ciudades frescas.
- Menos ruido en las calles.
- Conducción segura.
- Reducción de costos.
- Cumplimiento de las normativas de desarrollo urbano.
- Preservación de los ecosistemas nativos.
- Estética.

Por su parte, Castro et al. (2005) presentan las ventajas que ofrecen las superficies permeables frente a las impermeables:

- Disminuyen las puntas de caudal en los sistemas de drenaje y en los cauces receptores.
- Pueden llegar a mejorar la calidad del agua en gran medida por filtración, absorción y biodegradación, fundamentalmente.
- Ofrecen un amplio abanico de acabados superficiales para su inserción en el diseño urbano.
- Su puesta en obra es sencilla.
- Pueden recoger y hacerse cargo de la escorrentía procedente de superficies impermeables adyacentes.
- Son una solución muy flexible que permite ajustar el coste al uso y al tiempo de vida requeridos.
- En general, constituyen una solución más barata que la combinación de superficies impermeables y sistemas de drenaje convencionales.

Schlüter y Jefferies (2002) destacan, desde el punto de vista del drenaje urbano sostenible, que los pavimentos permeables disminuyen la cantidad de aguas pluviales que llega a los sistemas de alcantarillado y mejoran además su calidad, mediante el efecto filtro de las distintas capas que constituyen la sección permeable.

Respecto a la gestión de la cantidad de aguas pluviales, el uso de pavimentos permeables ofrece reducciones de coste al minimizar la generación de escorrentía superficial y por tanto las dimensiones de cunetas, sumideros y otros elementos parte del sistema de alcantarillado (Grover et al., 1972; Field et al., 1982).

En cuanto a la depuración que ofrecen los pavimentos permeables, diversos estudios han demostrado que su empleo mejora de forma significativa la calidad de las aguas que los atraviesan (Pratt et al., 1995; Pratt et al., 1996; Pratt et al., 1999; Newman et al., 2002; Puehmeier et al., 2004; Bayón et al. 2005). Los hidrocarburos contenidos en la escorrentía urbana son retenidos en el interior de los pavimentos permeables, pudiendo llegar a ser biodegradados con el paso del tiempo (Newman et al., 2003; Coupe et al., 2003; Bayón et al. 2005; Newman et al., 2006).

Los pavimentos permeables ofrecen también ventajas sociales, completando el triángulo de economía, medio ambiente y sociedad del desarrollo sostenible. Estas ventajas de servicio de los pavimentos permeables son, aparte de las mejoras estéticas, el aumento de la seguridad y de la comodidad de los ciudadanos en tiempos de lluvia, reduciendo el riesgo de accidentes de tránsito.

Además, los pavimentos permeables comparten las ventajas fundamentales ofrecidas por las capas de rodadura drenante, principalmente de mezcla bituminosa porosa.

Estas ventajas son (Pérez Jiménez et al., 1982; Gordillo, 2001):

- Disminuyen el riesgo de hidroplaneo.
- Absorben el ruido.
- Reducen las salpicaduras, asegurando una mejor visibilidad.
- Limitan la reverberación de los faros sobre el pavimento húmedo.
- Garantizan una elevada macrotextura, mejorando la resistencia al deslizamiento a velocidades elevadas.
- Tienen un elevado rozamiento interno, lo cual las hace poco sensibles a la deformación plástica.
- Ofrecen un buen aspecto estético.



Específicamente, el ruido es uno de los problemas más serios causados por el tránsito hoy en día. Según Bendtsen et al. (2005), las superficies de mezcla bituminosa porosa son la solución a este problema que ofrece una mejor relación costo-efectividad, permitiendo reducir de 3 a 4 dB el ruido producido por el tránsito. Con el objetivo de potenciar la ventaja de absorción del ruido, el proyecto SILVIA de la Unión Europea está trabajando en el desarrollo de nuevos tipos de superficies permeables. Además, Pagotto et al. (1999) demostraron que una superficie permeable de mezcla bituminosa porosa, por sí sola, permite una evacuación gradual del agua al sistema de drenaje, limitando el caudal punta y prolongando el tiempo de descarga. Estas superficies ofrecen también una depuración por filtrado y retención de parte de los sólidos en suspensión, metales pesados y hasta el 90% de los hidrocarburos presentes en la escorrentía superficial de una carretera.

#### II.2.4.2. INCONVENIENTES

Según Rodríguez Hernández (2008), los pavimentos permeables también presentan problemas que deben ser estudiados y tenidos en cuenta. Los principales inconvenientes comunes a todos los pavimentos permeables son:

- Colmatación.
- Degradación.
- Desconocimiento y desconfianza.

Debido a los dos primeros inconvenientes existen una serie de limitaciones en el uso de los pavimentos permeables. El riesgo de colmatación está determinado por el aporte total de sedimentos a la superficie. Este aporte es función de múltiples variables como la proximidad de materiales sueltos, la acción del viento o el régimen de precipitaciones. Como precaución, no es conveniente utilizar pavimentos permeables en regiones áridas, con alta erosión o actividad eólica. También se limita el uso de pavimentos permeables en zonas con suelos impermeables, regiones con abundantes ciclos hielo-deshielo o zonas de alto tránsito para evitar el riesgo de degradación estructural de la sección del firme (EPA, 1999b).

Además, en los pavimentos permeables con infiltración de agua al terreno, se deben evaluar los posibles riesgos de contaminación de aguas subterráneas (Hogland et al., 1987).

Ferguson (2005) resume las limitaciones de aplicación en las siguientes zonas no aptas para la construcción de pavimentos permeables:

- Áreas industriales contaminadas.
- Zonas con gran aporte de sedimentos.
- Áreas con gran pendiente.
- Carreteras con alta intensidad de tránsito pesado.

Steffen y Meinheit (2006) señalan que los errores y la falta de calidad en ejecuciones de pavimentos permeables se deben fundamentalmente a las faltas de formación y de control, unidas a la presión de los plazos de ejecución. Por ejemplo, es fundamental saber que las características de los materiales de construcción empleados en los pavimentos permeables son distintas a las de los empleados en los pavimentos impermeables dado que deben permitir el paso del agua, asegurando la durabilidad del firme (Shackel, 2006).

## **II.2.5. APLICACIONES**

Los pavimentos permeables son fundamentalmente utilizados en paseos públicos, estacionamientos, predios deportivos y calles de poco tránsito, ya que en calles muy transitadas pueden sufrir deformaciones importantes obstruyéndose sus poros y volviéndose impermeables (Solminihac & Castro, 2002).

Actualmente, el ámbito de aplicación de los pavimentos permeables no sólo se restringe a zonas residenciales de nueva construcción, sino que además se ha ampliado a zonas renovadas del centro urbano (Ferguson, 2006) e incluso se han llevado a cabo experiencias en zonas de servicio en aeropuertos (Knapton & Cook, 2006).

Según especificaciones de EPA (Environmental Protection Agency), los pavimentos permeables de hormigón pueden utilizarse en:

- Pavimentos con bajo volumen de tránsito
- Caminos residenciales, callejones y caminos de acceso
- Veredas
- Estacionamientos
- Canchas de tenis
- Sub-base para pavimentos de hormigón convencional
- Patios
- Estabilización de taludes
- Control de erosión

### **II.3. CARACTERÍSTICAS DE LOS PAVIMENTOS PERMEABLES DE HORMIGÓN POROSO**

El hormigón poroso es un material con los mismos componentes básicos que un hormigón convencional pero que se proyecta intencionalmente con un índice de poros muy superior al de un hormigón convencional. Este alto índice de poros proporciona una serie de características al hormigón (capacidad de drenaje, absorción de ruido y otras) que puede ser de gran interés en determinadas aplicaciones. La porosidad del mismo se consigue mediante una curva granulométrica discontinua en la que se disminuyen los áridos finos en relación a las curvas granulométricas usuales en hormigones convencionales (Aguado et al., 1992).

Para que el hormigón sea considerado poroso debe tener un mínimo de 15% de huecos, sin sobrepasar el 25% para evitar problemas de estabilidad (Solminihac & Castro, 2002). No deben confundirse el hormigón poroso y el hormigón ligero con arcilla expandida. Ambos tienen un peso específico entre 1700 y 2000 kg/m<sup>3</sup>, sin embargo, el primero es el único con huecos accesibles interconectados que permiten el paso del agua (Aguado, 1995).

Dependiendo de las exigencias requeridas al hormigón poroso pueden agregarse adiciones minerales y aditivos químicos con la finalidad de mejorar, por

ejemplo, los requisitos mecánicos y la durabilidad dependiendo de la aplicación del hormigón poroso.

El hormigón poroso ofrece resistencias medias a compresión entre 15 y 20 MPa y permeabilidades entre 0,5 y 5 cm/s (Aguado et al., 1992). A nivel experimental Yang y Jiang (2003) han logrado resistencias de 50 MPa mediante la adición de humo de sílice, superplastificante y polímeros orgánicos, obteniendo un hormigón poroso apto para todo tipo de vía urbana, bien en capas superficiales o de base. A nivel más práctico, existen aditivos registrados como por ejemplo el Ecocreto (2007) que permite alcanzar resistencias de 25 MPa. En cualquier caso, es necesaria la adición de polímeros o una mayor dotación de cemento para mantener un alto índice de huecos con una adecuada resistencia a los esfuerzos tangenciales del tránsito (Alegre Beneira & Xarles Romeu, 1996) (Rodríguez Hernández, 2008).

Las aplicaciones del hormigón poroso son muy variadas y pueden reemplazar al hormigón convencional en pavimentos de bajo tránsito, áreas de estacionamiento, veredas, senderos peatonales, ciclovías, entre otras, tanto en ámbito público como privado. Por otra parte Aguado et al. (1992), destaca otras aplicaciones aparte del uso como pavimentos, tales como: tubos de drenaje, pantallas anti-ruido y muros de drenaje. Siendo un ejemplo de estas aplicaciones, el muro de drenaje por debajo del muro estructural del embalse de salvaguardia de la Central Nuclear de Asco; en España (Aguado et al. 1986).

Según EPA (1999), el uso de estos pavimentos, está contraindicado en zonas o terrenos con suelos impermeables, regiones climáticas con permanentes ciclos hielo-deshielo, regiones áridas o con un alto grado de erosión eólica, zonas de alto tránsito, o donde exista alta posibilidad de colmatación.



Figura II-10 – Hormigón poroso usado como vereda en Olympia, WA, EE.UU.  
(Fuente: EPA - NPDES, 2009)



Figura II-11 – Calle residencial en Portland, OR, EE.UU.  
(Fuente: EPA - NPDES, 2009)

Con esta tesis se realiza un aporte a la gestión del escurrimiento pluvial urbano a través de la utilización de pavimentos de hormigón poroso, ya que la principal ventaja que presentan estos pavimentos es reducir el flujo superficial proveniente de lluvias torrenciales mediante la infiltración, al evitar que la zona pavimentada sea totalmente impermeable. Además, pueden remover elementos contaminantes del agua, tales como metales, aceites, grasas y sólidos suspendidos, al filtrarlos a través de las capas de arena y grava, ubicadas bajo la carpeta de rodado (Solminihac & Castro, 2002).



## **CAPÍTULO III – DISEÑO DE PAVIMENTO DE HORMIGÓN POROSO**





### **III.1. CONSIDERACIONES EN EL DISEÑO DE PAVIMENTOS DE HORMIGONES POROSOS**

Como se mencionó en el capítulo anterior, la finalidad de esta investigación es contribuir al control del escurrimiento pluvial urbano a través de la utilización de pavimentos permeables continuos de hormigón poroso, para ello es necesario el diseño de mezclas de hormigón poroso.

El hormigón poroso en pavimentos puede utilizarse en banquetas, bases y/o sub-bases y capas de rodadura. Los requisitos a cumplir, principalmente cuando el hormigón poroso se utiliza como capa de rodadura son: requisitos mecánicos (seguridad estructural), de funcionalidad, durabilidad, estéticos, de adecuación ambiental y aspecto económicos.

Para el diseño del pavimento de hormigón poroso se debe tener en cuenta:

- Diseño de la mezcla de hormigón poroso
- Diseño hidráulico e hidrológico
- Diseño estructural del pavimento

#### **III.1.1. CARACTERÍSTICAS DE LA MEZCLA DE HORMIGÓN POROSO**

El correcto diseño de las mezclas de hormigón permitirá cumplir con algunos de los requisitos exigidos a los pavimentos de hormigón poroso. La resistencia y permeabilidad obtenidas en un pavimento poroso está determinada por la mezcla que se va a utilizar.

Las principales variables que afectan el comportamiento del hormigón poroso son: granulometría, dosis de cemento, razón agua/cemento y 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 aditivo.

Las variables mencionadas anteriormente y la influencia de las mismas en el diseño de las mezclas de hormigón poroso se abordarán detalladamente en el

“Capítulo IV – Diseño de hormigón poroso”. En el mismo se analizan las recomendaciones de distintos autores y se detalla los resultados obtenidos experimentalmente en el diseño de mezclas con materiales y medios locales.

### **III.1.2. DISEÑO HIDRÁULICO E HIDROLÓGICO**

El diseño hidráulico e hidrológico debe conferir al pavimento la capacidad de gestionar las escorrentías urbanas de manera eficiente, reteniendo un evento de lluvia deseado, y evacuarlo controladamente hacia el terreno subyacente o al sistema de drenaje en un tiempo entre 24 y 48 horas. Por tanto, el diseño hidrológico e hidráulico de un pavimento poroso, se realiza con el fin de mitigar o solventar los problemas de cantidad y de calidad del agua pluvial.

Las herramientas fundamentales para realizar el diseño hidrológico e hidráulico de un pavimento permeable son: la lluvia de diseño y el volumen de agua afluente que recoge el pavimento. El correcto diseño de estas estructuras pasa por considerar las condiciones climatológicas y topográficas del emplazamiento del pavimento. A partir de la climatología local se obtiene información sobre el régimen de precipitaciones, lo cual es necesario para definir la lluvia de diseño. Por su parte, el análisis de la topografía permite identificar las cuencas drenantes hacia el pavimento, caracterizadas principalmente por el área y el grado de impermeabilidad, lo que determina el volumen de agua afluente a recoger por el pavimento (García Haba, 2011).

### **III.1.3. DISEÑO ESTRUCTURAL**

El diseño estructural de un pavimento permeable se centra básicamente en la definición del espesor mínimo de la estructura. En este caso, los criterios de diseño deben ser aquellos que proporcionen la capacidad portante adecuada a la categoría de tránsito que deba soportar el pavimento, sin que este sufra deformaciones importantes.

Aunque el procedimiento de diseño depende de la superficie permeable empleada, siempre se contemplan los siguientes pasos:

- Establecer la categoría de tránsito.
- Comprobar la calidad del terreno para asegurar la capacidad portante de la estructura. En caso de ser necesario, mejorar la capacidad portante.
- Seleccionar el tipo de sub-base y su espesor.
- Seleccionar el espesor de la superficie permeable.

El diseño hidráulico e hidrológico y el diseño estructural del pavimento se detallan en el “Capítulo V – Diseño hidráulico e hidrológico y diseño estructural”.

#### III.1.4. RECOMENDACIONES EN FUNCIÓN DE LA APLICACIÓN DEL HORMIGÓN POROSO EN UN PAVIMENTO

Como se mencionó anteriormente, el hormigón poroso puede utilizarse en diferentes partes de un pavimento, ya sea como banquina, base o sub-base o como capa de rodadura. A continuación se mencionan las características y requisitos que debe cumplir el hormigón dependiendo de su aplicación:

**Banquinas:** en este caso se aprovecha las propiedades que presenta el hormigón poroso para evacuar con rapidez el agua que puede acumularse en la zona. Como es sabido el agua en dicha zona tiene una gran influencia en el deterioro de la losas por el posible bombeo de finos y descalce de las losas, sobre todo cuando éstas se disponen sin pasadores (Aguado et al., 1992). En este caso se utilizan hormigones pobres con cantidades de cemento de entre 150 a 160 kg/m<sup>3</sup> y relación agua/cemento de 0,5 a 0,6, exigiéndose resistencias a compresión a 28 días de 10 MPa.

**Bases y/o sub-bases:** en esta solución, al hormigón poroso, aparte de la función drenante, se le requieren características mecánicas mínimas para ser capaz de absorber las tensiones originadas por el tránsito, sin producirse la rotura. Esta solución puede ser de gran interés en zonas urbanas (parques, estacionamiento, etc.) especialmente en aquellos terrenos planos de difícil drenaje, lo cual puede ser muy útil en ciudades en crecimiento en las que no es posible aumentar las dimensiones de los conductos de alcantarillado para absorber los caudales

adicionales procedentes de las nuevas zonas desarrolladas. Estas capas porosas pueden servir de pequeño embalse regulador, laminando los grandes aguaceros. Hay que tener presente que la propia estructura porosa favorece la evaporación posterior del agua almacenada. Bajo la capa de hormigón poroso puede emplearse una lámina de impermeabilización o no en función de las circunstancias específicas del pavimento y del terreno sobre el que se apoya (Aguado et al., 1992).

En estas capas los contenidos de cemento deben llegar a  $170 \text{ kg/m}^3$ , según recomendaciones seguidas en España y EE.UU (California). Los espesores utilizados habitualmente oscilan entre 10 y 15 cm. Los hormigones porosos utilizados en bases drenantes de aeropuertos tienen dosificaciones similares a las empleadas en rutas. Este es el caso de la prolongación de la pista del aeropuerto Charles de Gaulle de París, donde se utilizaron 40 cm de hormigón, 10 cm de hormigón poroso, 20 cm de grava-cemento y 30 cm de suelo estabilizado con cal. En este caso se utilizaron  $200 \text{ kg/m}^3$  de cemento.

**Capa de rodadura:** a una capa de rodadura, se le debe exigir diferentes requisitos. Al cuantificar estos requisitos, los valores serán diferentes en función de las sollicitaciones exteriores, ubicación de la obra y los condicionantes generales de la puesta en obra. En esta capa la resistencia a compresión a 28 días debe encontrarse entre 15 y 20 MPa, con una porosidad que oscila entre el 15 y 25% y adecuada permeabilidad. Se recomienda un contenido de cemento que puede variar de 200 a  $450 \text{ kg/m}^3$  dependiendo de la bibliografía consultada y con relaciones agua/cemento entre 0,27 a 0,4 dependiendo del uso o no de aditivos.

### III.2. DISEÑO DE LA MEZCLA DE HORMIGÓN POROSO

De acuerdo con el Reporte 522-R06 (2006) del “American Concrete Institute (ACI)”, el hormigón permeable es un material de estructura abierta con asentamiento cero, compuesto por cemento Pórtland, agregado grueso, poco o nada de finos, aditivos y agua. La combinación de estos materiales produce un material endurecido con poros interconectados cuyo tamaño varía de 2 a 8 mm, lo que permite el paso de agua.

Las principales variables que afectan el comportamiento del hormigón permeable, según ACI 522-R06 son:

- Porcentaje de vacíos
- Tamaño máximo, procedencia y rugosidad o forma del agregado grueso
- Relación Agua/Cemento (A/C)
- Relación Agregado Grueso/Cemento (AG/C)
- Uso de aditivos

En la Tabla III-1 se presentan las propiedades típicas del hormigón poroso y su variación en función de la totalidad de la bibliografía analizada.

Tabla III-1. Propiedades típicas del hormigón poroso

Propiedad	Rango
Asentamiento (mm)	0-20
Peso unitario (kg/m <sup>3</sup> )	1600-2000
Porosidad, % (en volumen)	15-25
Permeabilidad (cm/seg)	0,2-5,0
Resistencia a compresión (MPa)	3,5-28,0
Resistencia a tracción por flexión (MPa)	1,0-3,8

En este capítulo se estudian los materiales componentes del hormigón poroso, las propiedades del mismo en estado fresco y endurecido y los ensayos que miden dichas propiedades.

## III.2.1. MATERIALES COMPONENTES

### III.2.1.1. CEMENTOS

Como materiales cementicios puede utilizarse cemento Pórtland de uso general, cementos adicionados y adiciones minerales como ceniza volante, humo de sílice o escorias de alto horno. Según recomendaciones de la EPA la cantidad de

cemento a utilizar para hormigones porosos varía entre 270 y 415 kg/m<sup>3</sup>. Los cementos se encuentran normalizados en Argentina por la norma IRAM 50000 (2014). “Cemento para uso general. Composición, características, evaluación de la conformidad y condiciones de recepción”.

#### III.2.1.2. ADICIÓN MINERAL. CENIZA VOLANTE

Las cenizas volantes, son residuos sólidos que resultan de la combustión del carbón pulverizado en las usinas termoeléctricas.

La ceniza volante reduce la demanda de agua en estado fresco y aumenta la resistencia mecánica del hormigón en estado endurecido pues tienen propiedades puzolánicas. Las cantidades máximas a utilizar no deben superar el 25% del total de los materiales cementicios.

#### III.2.1.3. AGREGADOS

El hormigón poroso está compuesto generalmente por agregado grueso de un solo tamaño y el agregado fino está limitado a pequeñas cantidades o se elimina de la composición de las mezclas. Si bien, al utilizar agregado fino se incrementa la resistencia, puede reducir el contenido de vacíos y por lo tanto la permeabilidad, que es la principal característica del hormigón poroso.

De acuerdo a las recomendaciones de la bibliografía consultada pueden utilizarse agregados gruesos de tamaños máximos variables entre 9,5 y 19 mm. Los agregados pueden ser canto rodado o triturados. Los agregados de tipo canto rodado producen mayores resistencias. Crouch et al. (2005) indican que estos agregados, por su forma y textura, disminuyen la cantidad de vacíos en comparación con mezclas que utilizan agregados angulosos rugosos. Las resistencias aumentan, ya que existe un menor contenido de vacíos en el material y esto genera trabazón entre las partículas. Los agregados de tamaño pequeño y textura suave producen mezclas más trabajables, aunque requieren de mayor cantidad de cemento. Por otro lado, granulometrías más uniformes y de tamaño máximo menor sí disminuyen la permeabilidad del hormigón poroso, pero su efecto no es tan pronunciado como la ganancia en resistencia que se obtiene.

Con respecto a la cantidad de agregado grueso a utilizar, la bibliografía recomienda 1190 a 1480 kg/m<sup>3</sup> y una relación agregado/material cementicio que varía entre 4 a 4,5.

En estas mezclas es común que no se utilice agregado fino; sin embargo, en caso de ser necesario se recomienda su uso en bajos contenidos, cuidando que no se reduzca la permeabilidad del hormigón. Fernández, Vitola y Salminci (2001), recomiendan usar entre 5 y 30% de agregado fino con respecto al agregado grueso (AF/AG) según el uso que se le quiera dar al hormigón poroso. El límite inferior se recomienda para que la adherencia del mortero con las partículas de agregado sea la suficiente para evitar segregación y resistencias muy bajas. Adicionalmente, el uso de agregado fino aumenta la trabajabilidad de las mezclas lo cual implica un beneficio en su manejo y colocación.

#### III.2.1.4. ADITIVOS

Los aditivos deben cumplir con la Norma IRAM 1663 (2002), la cual los define como: “Material que, aparte del cemento, los agregados y el agua empleados normalmente en la preparación del hormigón, pueden incorporarse durante o después de la preparación del pastón con el objeto de modificar alguna o varias de sus propiedades en forma deseada”.

Por lo general en este tipo de hormigones se utilizan aditivos plastificantes e hiperfluidificantes con la finalidad de reducir el contenido de agua del hormigón mejorando las propiedades del mismo en estado fresco o endurecido.

#### III.2.1.5. AGUA

El agua de mezclado tiene como finalidad la hidratación del cemento y actuar como lubricante contribuyendo a la trabajabilidad de la mezcla. Es por eso que la misma debe cumplir con norma IRAM 1601 (2012) y en el Reglamento CIRSOC 201 (2005).

Por otro lado, la cantidad de agua es un factor determinante en el hormigón poroso, ya que la resistencia del hormigón depende de la adherencia entre la pasta de cemento y las partículas de agregado grueso. Es por ello que la falta de agua provocará la falta de adherencia, mientras que el exceso de agua puede generar la

obstrucción de los poros, al producirse segregación de la pasta. La bibliografía consultada recomienda utilizar relaciones agua/cemento ( $a/c$ ) que van desde 0,27 a 0,30 en el caso de utilizar aditivos y 0,34 a 0,40 se consideran aceptables sino se utilizan aditivos.

Además, la dosis de agua utilizada en una mezcla tiene gran repercusión en las propiedades de la misma. Una cantidad insuficiente de agua dará como resultado una mezcla de consistencia inadecuada y con baja resistencia. Una cantidad excesiva de agua, generará una pasta que sellará los vacíos de la mezcla y segregará, repercutiendo en el porcentaje de vacíos y en la resistencia al desgaste superficial. Se suele utilizar como criterio para determinar la cantidad de agua correcta, el encontrar la cantidad de agua con la cual la pasta adquiere un brillo metálico (FCPA, 1990).

En la Figura III-1 se observa muestras de hormigón poroso con distintos contenidos de agua.



Figura III-1. Muestras de hormigón poroso con diferentes contenidos de agua. (a) poca cantidad de agua, (b) cantidad apropiada de agua (c) demasiada cantidad de agua. (Fuente: EPA, 1999)

### III.2.2. VARIABLES INTERVINIENTES

Para el diseño de mezclas las variables intervinientes son las siguientes:

- Cantidad de cemento por metro cúbico de mezcla
- Relación agua/cemento
- Relación pasta/agregado
- Tamaño máximo y procedencia del agregado grueso



- Incorporación de agregado fino
- Utilización de adiciones minerales
- Uso de aditivos

### **III.2.3. DOSIFICACIONES**

En el hormigón poroso, a diferencia del hormigón convencional, la cantidad de pasta es limitada y por esta razón, la resistencia depende del contacto entre los agregados. Relaciones bajas agregado grueso/cemento (AG/C) implica que existe un mayor porcentaje de pasta, capaz de proveer mejores enlaces entre partículas de agregado y con ello mejorar la resistencia, en contrapartida se produce una disminución en la permeabilidad ya que el aumento porcentual de pasta implica que se rellenen mayor cantidad de vacíos.

Mulligan (2005) estudió relaciones AG/C entre 4/1 y 8/1, llegando a la conclusión que la permeabilidad no se ve seriamente afectada por esta variable mientras la pasta no produzca obstrucciones. Sin embargo, descubrió que las relaciones AG/C que brindan resistencias aceptables para pavimentos se encuentran entre 4/1 y 5/1 como máximo.

### **III.2.4. PROPIEDADES DEL HORMIGÓN POROSO**

De acuerdo con la bibliografía analizada y según Reporte ACI 522R-06 (2006), las mezclas de hormigón poroso deben ser compactadas con un rodillo pesado de ancho mayor que el de la losa a hormigonar y deben generar una presión de 4 a 7 t/m<sup>2</sup>.

#### **III.2.4.1. PROPIEDADES EN ESTADO FRESCO**

De acuerdo a la definición del Reporte ACI-522R-06 (2006) el hormigón permeable es un material de estructura abierta y con asentamiento cero. Sin embargo, de acuerdo a la bibliografía consulta el asentamiento puede llegar hasta 20 mm.

Debido al nulo o bajo asentamiento del hormigón poroso, el inconveniente principal es lograr una mezcla con trabajabilidad y consistencia adecuada sin variar las propiedades del hormigón en estado endurecido. La trabajabilidad se encuentra afectada por la escasa o nula presencia de agregado fino y por la cantidad de agua, ya que el balance adecuado entre permeabilidad y resistencia del hormigón poroso admiten relaciones agua/cemento bajas. Debido a que una cantidad excesiva de agua generará una pasta que sellará los vacíos de la mezcla y segregará, repercutiendo en el porcentaje de vacíos y la permeabilidad del hormigón. Usualmente estas mezclas requieren el uso de aditivos plastificantes e hiperfluidificantes de modo de poder reducir el contenido de agua logrando consistencia y trabajabilidad adecuada.

Las propiedades a evaluar en estado fresco del hormigón poroso se relacionan principalmente con la trabajabilidad y consistencia de la mezcla. Para cuantificar estas propiedades se realizan ensayos como “Método de Hand-Squeeze” y “Tronco de cono de Abrams invertido”, recomendados por la National Ready Mixed Concrete Association (NRMCA). Adicionalmente se realiza el ensayo de asentamiento para analizar cualitativamente la cohesión y posibilidad de segregación de las mezclas.

Es importante también la determinación del peso de la unidad de volumen del hormigón poroso, ya que el mismo es aproximadamente un 70% menor que el peso unitario del hormigón convencional.

#### III.2.4.1.1. Ensayos en hormigón poroso en estado fresco

##### ***MÉTODO DE HAND-SQUEEZE (NRMCA, NATIONAL READY MIXED CONCRETE ASSOCIATION)***

Una prueba muy común para determinar la consistencia de la mezcla en hormigones porosos, consiste en intentar hacer una “bola” de mezcla con la mano. Si de apretar y soltar un puñado de mezcla resulta que 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. (National Ready Mixed Concrete Association (NRMCA), “Pervious Concrete Testing”, disponible online en: <http://www.nrmca.org/>). En la Figura III-2 se puede observar el método de ensayo Hand-Squeeze.



Figura III-2. Método de Hand-Squeeze serie K

### **ENSAYO DE TRONCO DE CONO DE ABRAMS INVERTIDO (NRMCA)**

El ensayo de asentamiento de cono invertido es cualitativo y permite una rápida evaluación de la viabilidad de la mezcla. El procedimiento implica apoyar la base menor del cono sobre una superficie dura y lisa. Se llena el cono hasta enrasar con hormigón fresco sin compactar y se lo deja reposar. Se observa la posible “fuga de pasta” y la segregación de agua tal como se presenta en la Figura III-3 (National Ready Mixed Concrete Association (NRMCA), “Pervious Concrete Testing”, disponible online en: <http://www.nrmca.org>). Por lo que este ensayo evalúa la trabajabilidad del hormigón fresco y se observa la posible segregación de la mezcla.



Figura III-3. Ensayo de Tronco de cono de Abrams invertido

### **ENSAYO DE ASENTAMIENTO CON TRONCO DE CONO DE ABRAMS DE ACUERDO A NORMA IRAM 1536**

Este ensayo no se considera dentro de los controles de calidad, como en el caso del hormigón convencional; sólo se considera como un valor de referencia, debido principalmente a que la mezcla es demasiado rígida y la medición del asentamiento en la mayoría de los casos no es aplicable.

Este ensayo se realiza para controlar que el asentamiento no supere los valores recomendados, los cuales suelen estar entre 0 y 20 mm, llegando en algunos casos hasta 50 mm.

Por otro lado, el ensayo de asentamiento de Abrams, permite evaluar de forma cualitativa la posible segregación de la mezcla según la norma ASTM C1611, 2014. Una vez realizado el ensayo, se pueden efectuar distintos análisis para calificar la estabilidad de la mezcla.

### **PESO DE LA UNIDAD DE VOLUMEN (NORMA ASTM C1688, 2014)**

El peso unitario del hormigón poroso es menor que el de hormigones convencionales, siendo el mismo aproximadamente un 70% del peso unitario del hormigón convencional. Según bibliografía consultada el peso unitario del hormigón poroso en estado fresco debe variar entre 1600 y 2000 kg/m<sup>3</sup>.

#### **III.2.4.2. PROPIEDADES EN ESTADO ENDURECIDO**

De acuerdo a la bibliografía, las principales propiedades del hormigón poroso en estado endurecido son la porosidad, la permeabilidad, la resistencia a compresión y tracción por flexión.

La porosidad que presentan las mezclas de hormigón poroso varía según la energía de compactación, la granulometría del agregado utilizada, la relación agua/cemento y el contenido del material cementante utilizado (Reporte ACI 522-06, 2006), este porcentaje debe ser mayor al 15% para que el hormigón sea considerado poroso, recomendándose no superar el 25% por la poca estabilidad de la mezcla. A su vez, una elevada porosidad aumenta la permeabilidad y disminuye la resistencia.

La permeabilidad, al igual que la porosidad, depende de las propiedades de los materiales, la dosificación de la mezcla y los métodos de colocación y compactación. Según la bibliografía analizada, la permeabilidad del hormigón poroso puede variar entre 0,2 a 5,0 cm/seg.

La resistencia a compresión está influenciada principalmente en este tipo de hormigones por los materiales componentes, la compactación y por el porcentaje de vacíos, variando entre 3,5 y 28,0 MPa, siendo el valor de resistencia a compresión típica del orden de 17,0 MPa.

La resistencia a tracción por flexión varía generalmente entre 1,0 y 3,8 MPa. Su determinación puede estar sujeta a importante variabilidad, por lo que es común medir la resistencia a compresión y usar relaciones empíricas para estimar su valor.

#### III.2.4.2.1. Ensayos en hormigón poroso en estado endurecido

##### **RESISTENCIA A COMPRESIÓN**

Los ensayos de resistencia a compresión se realizaron a las edades de 7 y 28 días según Norma IRAM 1546 (2013), utilizándose prensa hidráulica.

##### **RESISTENCIA A TRACCIÓN POR FLEXIÓN**

Los ensayos de resistencia a tracción por flexión se realizaron a la edad de 28 días según Norma IRAM 1547 (1992).

##### **POROSIDAD**

Para determinar la porosidad del hormigón, el método utilizado se basó en el Principio de Arquímedes, principio físico que afirma que “Un cuerpo total o parcialmente sumergido en un fluido en reposo, recibe un empuje de abajo hacia arriba igual al peso del volumen de fluido que desaloja”.

La porosidad se determina según la Ecuación III-1:

$$V_e = h_2 - h_1$$

$$V_v = V_g - V_e$$

$$V_{[\%]} = \frac{V_v}{V_g} \cdot 100$$

Ecuación III-1

Donde:

$V_g$  = volumen geométrico de la probeta,

$h_1$  = altura inicial de la probeta,

$h_2$  = altura final de la probeta,

$V_e$  = volumen de la estructura del hormigón poroso,

$V_v$  = volumen de vacíos del hormigón poroso,

$V_{[%]}$  = porosidad (porcentaje de vacíos)

### **COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD AL AGUA (K)**

Mediante diversas experimentaciones, Henry Darcy (1856), descubrió y denominó al coeficiente de permeabilidad como la velocidad del agua a través del suelo, representada por k.

Se aplicó este principio para determinar la permeabilidad del hormigón poroso y realizar la prueba comúnmente usada en laboratorio que es la Prueba de Carga Variable mediante un permeámetro de carga variable. Este tipo de permeámetro mide la cantidad de agua que pasa a través de la muestra por diferencia de niveles de carga hidráulica en un tubo manométrico.

Cabe destacar que este es sólo un ensayo de laboratorio, el cual permite realizar una evaluación preliminar de la permeabilidad del hormigón poroso.

El comité 522 del ACI presentó el permeámetro de Neithalath et al. (2006) y la fórmula para calcular el coeficiente de permeabilidad, pero se observó que la constante propuesta por el autor tiene un error igual al logaritmo natural de 10 ( $\ln(10) = 2,33$ ).

En este trabajo la permeabilidad se midió a partir de la medición en un instrumento de fabricación propia de acuerdo a lo establecido en la norma ACI-522R-06 con modificaciones en las dimensiones y utilizando la fórmula correcta de cálculo para el coeficiente k.

Para el cálculo se utiliza la Ecuación III-2.

$$K = \frac{A_{tubo}}{A_{muestra}} \cdot \frac{L}{t} \cdot \ln\left(\frac{h_1}{h_2}\right) \quad \text{Ecuación III-2}$$

Donde:

$K$  = coeficiente de permeabilidad

$A_{\text{tubo}}$  = área por donde ingresa el caudal de agua

$A_{\text{muestra}}$  = área de la probeta

$L$  = longitud de la muestra

$t$  = tiempo en que tarda el agua en descender de una altura inicial  $h_1$  a una final  $h_2$ .

$h_1$  = altura inicial de caída. (30 cm)

$h_2$  = altura final de caída. (10 cm)





## **CAPÍTULO IV – DISEÑO DE HORMIGÓN POROSO**



## IV.1. MEZCLA DE HORMIGÓN POROSO

Uno de los objetivos de la investigación en esta tesis ha sido encontrar una dosificación adecuada para la elaboración de hormigón poroso con materiales locales, de resistencia y permeabilidad suficiente, para su empleo como pavimento permeable en zonas de bajo volumen de tránsito que permita un adecuado escurrimiento pluvial para una mejor gestión de las aguas de lluvia.

El plan experimental se llevó a cabo elaborando diferentes dosificaciones, que se identifican como series, que comprenden desde la serie “A” hasta la serie “N”. Debido a que las propiedades del hormigón poroso difieren a las del hormigón convencional es que se plantearon tres etapas para la realización de pastones, siendo diferentes las variables intervinientes en cada etapa y surgiendo del análisis de resultados de la etapa anterior. Las dosificaciones se realizaron según recomendaciones bibliográficas y adaptación a los materiales y tecnología local.

La primer etapa comprende desde la serie A (hormigón patrón) hasta la serie D, donde las proporciones de agregado fino y grueso, y la incorporación de aditivos fueron las variables intervinientes, mientras que se mantuvo constante la relación pasta/agregado y agua/cemento, a excepción de la serie C en donde se varió la relación pasta/agregado. Las series E, F y G integran la segunda etapa de hormigones, en donde las variables intervinientes fueron la relación agua/cemento, los aditivos, la procedencia del agregado grueso y forma de compactación, además de la incorporación de ceniza volante como adición. Finalmente la tercera etapa comprende desde la serie H hasta N, en las cuales se utilizó agregado grueso triturado de procedencia local, variando el tamaño máximo y las proporciones de agregado grueso y fino. Además se redujo la cantidad de cemento y se reemplazó parte del mismo por ceniza volante, variando la relación agua/cemento y pasta/agregado.

Las etapas detalladas anteriormente dan lugar a 14 series de mezclas, cuya composición y relaciones utilizadas para su dosificación se indican más adelante en la sección IV.1.1.2.

En este capítulo se presenta la caracterización de los materiales, la elaboración de las mezclas y la elección de la dosificación adecuada para la realización del pavimento de hormigón permeable a nivel local.

Del análisis y discusión de los resultados de ensayos de la totalidad de la series se obtuvo la dosificación final para el hormigón poroso a emplear en el pavimento permeable en el estudio de caso.

## **IV.1.1. MATERIALES Y DOSIFICACIONES**

### **IV.1.1.1. CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES COMPONENTES**

#### **IV.1.1.1.1. Cemento**

En la primera etapa de hormigones, Serie A hasta D se utilizó cemento Pórtland compuesto, mientras que para las series E hasta N, se utilizó cemento Pórtland normal con la adición de ceniza volante.

**Cemento portland compuesto**, categorizado como CPC 40 (Norma IRAM 50000 - 2014) de procedencia local, Córdoba, Argentina. Densidad relativa: 3,06.

**Cemento portland normal**, categorizado como CPN 40 (Norma IRAM 50000 - 2014) de procedencia local, Córdoba, Argentina. Densidad relativa: 3,15.

#### **IV.1.1.1.2. Adición mineral**

Se utilizó como adición mineral ceniza volante procedente de la central Térmica San Nicolás en la provincia de Buenos Aires, cuyas propiedades se observan en la tabla IV-1, correspondiendo a puzolana Clase F, según Clasificación de la Norma ASTM C618 - 2003).

Tabla IV-1. Propiedades ceniza volante

Propiedades	Unidad	Valor
SiO <sub>2</sub>	%	44,75
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	24,37
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	8,02
CaO	%	6,54
MgO	%	1,32
SO <sub>3</sub>	%	0,33
K <sub>2</sub> O	%	0,57
TiO <sub>2</sub>	%	1,41
Pérdida por calcinación	%	9,21
Densidad Aparente	g/cm <sup>3</sup>	0,84
Densidad Absoluta	g/cm <sup>3</sup>	2,20

#### IV.1.1.1.3. Agregado grueso

El agregado grueso utilizado en la primera y segunda etapa, serie A hasta F, fue de tipo canto rodado de tamaño máximo 9,5 mm. Las propiedades físicas del agregado grueso se presentan en la Tabla IV-2.

Tabla IV-2. Propiedades físicas del agregado grueso. (Serie A – F)

Ensayo / Propiedad	Resultado
Tamaño máximo nominal [mm] – IRAM 1505 (2003)	9,5
Densidad relativa saturado a superficie seca [kg/dm <sup>3</sup> ] – IRAM 1533 (2002)	2,64
Contenido de espacios vacíos [%] – IRAM 1548 (2003)	37,71
Absorción [%] - IRAM 1533 (2002)	0,7

La distribución granulométrica del agregado grueso y las curvas límites según Norma IRAM 1627 (1997) se presenta en la Figura IV-1.

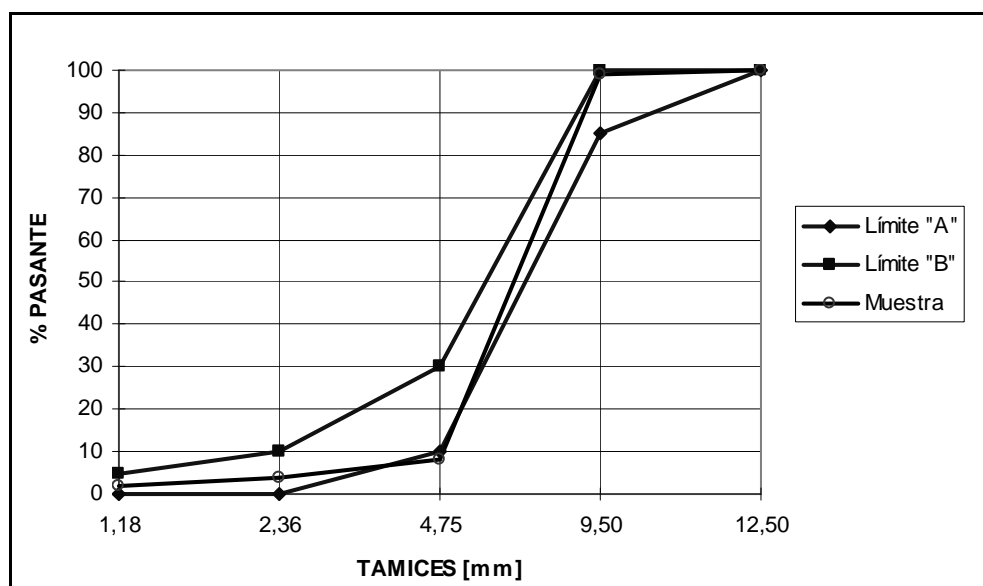


Figura IV-1. Granulometría del agregado grueso. (Serie A – F)

En la serie G de la segunda etapa y en las series H hasta N de la tercera etapa experimental se utilizó para la realización de mezclas agregado grueso triturado de procedencia local y de tamaño máximo variable. El tamaño máximo de los agregados utilizado fue 9,5 mm, 12,5 mm y 19 mm., cuyas propiedades físicas se presentan en la Tabla IV-3, IV-4 y IV-5 respectivamente.

Tabla IV-3. Propiedades físicas del agregado grueso (Serie G – N).  $T_{m\acute{a}x} = 9,5$  mm.

Ensayo / Propiedad	Resultado
Tamaño máximo [mm] – IRAM 1505 (2003)	9,5
Densidad relativa saturado a superficie seca [kg/dm <sup>3</sup> ] – IRAM 1533 (2002)	2,58
Contenido de espacios vacíos [%] – IRAM 1548 (2003)	38,73
Absorción [%] - IRAM 1533 (2002)	0,76

Tabla IV-4. Propiedades físicas del agregado grueso (Serie G – N).  $T_{m\acute{a}x} = 12,5$  mm.

Ensayo / Propiedad	Resultado
Tamaño máximo [mm] – IRAM 1505 (2003)	12,5
Densidad relativa saturado a superficie seca [kg/dm <sup>3</sup> ] – IRAM 1533 (2003)	2,58
Contenido de espacios vacíos [%] – IRAM 1548 (2003)	37,9
Absorción [%] - IRAM 1533 (2002)	0,76

Tabla IV-5. Propiedades físicas del agregado grueso (Serie G – N) .  $T_{m\acute{a}x} = 19,0$  mm.

Ensayo / Propiedad	Resultado
Tamaño máximo [mm] – IRAM 1505 (2003)	19,0
Densidad relativa saturado a superficie seca [kg/dm <sup>3</sup> ] – IRAM 1533 (2003)	2,58
Contenido de espacios vacíos [%] – IRAM 1548 (2003)	37,07
Absorción [%] - IRAM 1533 (2002)	0,76

#### IV.1.1.1.4. Agregado fino

El agregado fino utilizado en la primer etapa, en la series B y C es de origen natural del paleocauce del Río Anisacate (Córdoba). En la Tabla IV-6 se presentan las propiedades físicas.

Tabla IV-6. Propiedades físicas del agregado fino (Serie B y C)

Ensayo / Propiedad	Resultado
Módulo de finura Norma IRAM 1505 (2003)	3,11
Densidad relativa saturado a superficie seca [kg/dm <sup>3</sup> ] - IRAM 1520 (2002)	2,63
Absorción [%] - IRAM 1520 (2002)	0,9

La distribución granulométrica del agregado fino utilizado se presenta en la Figura IV-2, cumpliendo los requisitos indicados en Normas Argentinas IRAM 1527 (1997).

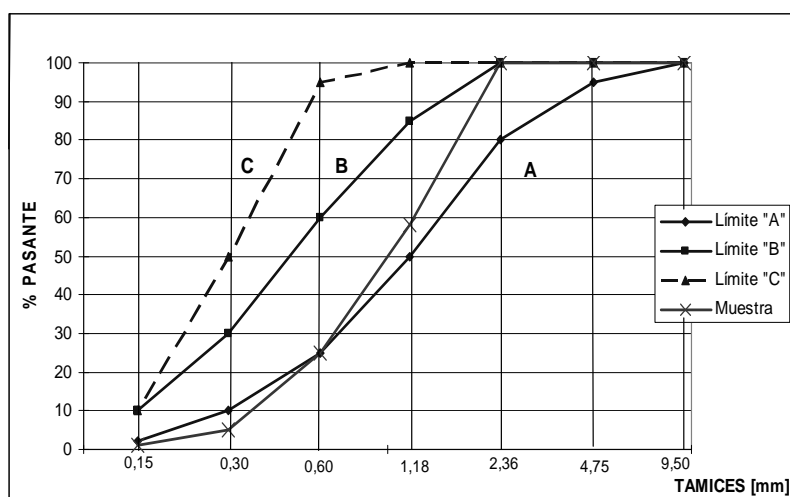


Figura IV-2. Granulometría del agregado fino (Serie B y C)

En la tercera etapa, en las series K, L y N se utilizaron agregados finos de distinta procedencia, siendo la arena gruesa de procedencia local y arena fina Paraná. Las propiedades físicas se observan en la Tabla IV-7 y IV-8 respectivamente.

Tabla IV-7. Propiedades físicas del agregado fino (procedencia local)

Ensayo / Propiedad	Resultado
Módulo de finura IRAM 1505 (2003)	3,51
Densidad relativa saturado a superficie seca [kg/dm <sup>3</sup> ] - IRAM 1520 (2002)	2,63
Absorción [%] - IRAM 1520 (2002)	1,19

Tabla IV-8. Propiedades físicas del agregado fino (arena fina Paraná)

Ensayo / Propiedad	Resultado
Módulo de finura Norma IRAM 1505 (2003)	1,34
Densidad relativa saturado a superficie seca [kg/dm <sup>3</sup> ] - IRAM 1520 (2002)	2,63
Absorción [%] - IRAM 1520 (2002)	0,86

Las curvas granulométricas de ambos agregados finos se muestran en las Figuras IV-3 y IV-4.

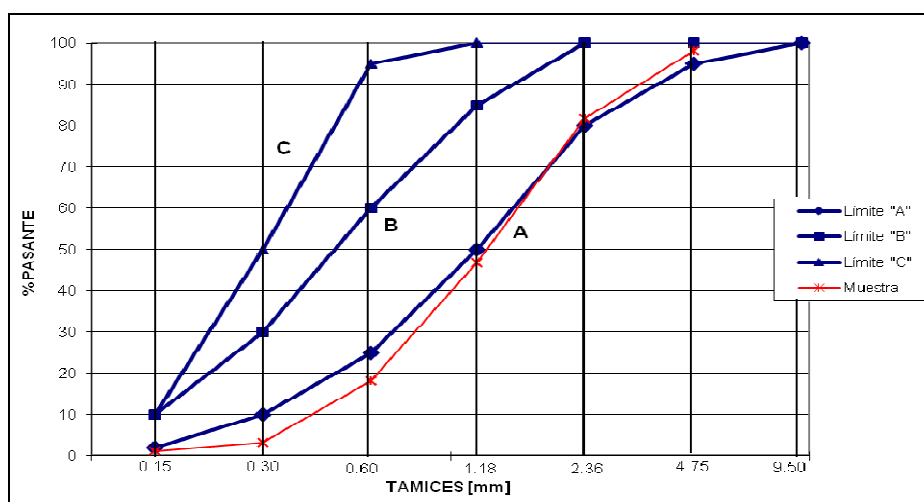


Figura IV-3. Granulometría del agregado fino (procedencia local)



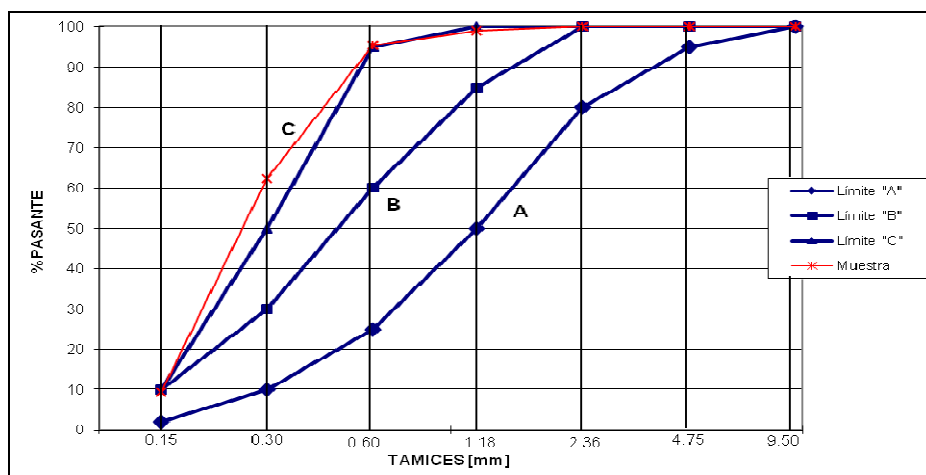


Figura IV-4. Granulometría del agregado fino (Paraná)

#### IV.1.1.1.5. Aditivos

En las mezclas realizadas se utilizaron dos tipos de aditivos:

Hiperfluidificante de última generación de base éter policarboxilato; su residuo sólido es de 36,2%. Densidad: 1,12 kg/lit.

Aditivo específico para hormigón permeable SMART CRETE comercializado por la empresa Chilena Concretos Especiales S.R.L. Compuesto a base de naftaleno sulfonado, con densidad de 1,5 kg/lit.

En la tercera etapa de mezclas, serie H hasta N, se utilizó el aditivo SMART CRETE ya que se observó en las etapas anteriores un mejor comportamiento del hormigón en estado fresco, lográndose una mezcla con buena adherencia entre partículas de agregado grueso.

#### IV.1.1.1.6. Agua

Se utilizó agua potable, que cumple con los requisitos establecidos en la Norma IRAM 1601 (2012) y en el reglamento CIRSOC 201.

#### IV.1.1.2. DOSIFICACIONES

De acuerdo al análisis bibliográfico y adaptado a los materiales locales, se planteó la primera dosificación, denominada serie A, la cual sirvió como hormigón patrón. En esta dosificación se fijó la relación pasta/agregado grueso, la relación a/c

y la cantidad de cemento por metro cúbico de hormigón. En las dosificaciones se consideró a los agregados en estado saturado superficie seca.

A partir de los resultados obtenidos en el pastón patrón, denominado serie A, se modificó la dosificación inicial para las siguientes series. En la serie B se reemplazó un 50% del agregado grueso de la dosificación inicial por agregado fino y se mantuvieron el resto de los parámetros constantes, con la finalidad de mejorar las propiedades del hormigón en estado fresco.

De los resultados obtenidos se observó que los hormigones de la serie A y B resultaban porosos pero la resistencia a compresión era baja, por lo que se decidió incrementar un 25% la relación pasta/agregado y mantener constante las relación agua/cemento de la serie B; identificando a esta nueva dosificación como serie C.

A través del análisis de resultados de ensayos de la serie C, se evidenció que el cambio en la relación pasta/agregado no logró mejorar la resistencia a compresión y produjo además una disminución en la porosidad del hormigón.

Al analizar las series anteriores, se observó una alta porosidad en la serie A, y en estado fresco el hormigón presentaba problemas de trabajabilidad. Es por ello que con la finalidad de mejorar la trabajabilidad de la mezcla sin cambiar la relación a/c, se decidió incorporar a la dosificación de la serie A un aditivo hiperfluidificante, obteniéndose la dosificación para la serie D.

Las series anteriores se agruparon dentro de la primera etapa experimental, la cual permitió a través de la información obtenida comprender la influencia de las distintas variables intervinientes en la dosificación debido a que difieren a las de un hormigón convencional.

Del análisis anterior y en busca de un incremento en la resistencia a compresión y en la porosidad del hormigón, se planteó una segunda etapa de mezclas, formada por las series E, F y G.

En la dosificación de la serie E y F se mantuvieron los mismo parámetros con excepción del tipo de aditivo utilizado. En la serie E se utilizó un aditivo específico para hormigón poroso denominado Smart Crete, de procedencia Chilena, en cambio en la serie F se utilizó el mismo hiperfluidificante que en la serie D. Por otro lado y con respecto a las dosificaciones de la primer etapa, en las series E y F se

disminuyó la relación a/c y pasta/agregado y se aumentó el contenido de cemento por metro cúbico de hormigón. Además se adicionó ceniza volante con la finalidad de mejorar la cohesión de las mezclas y aumentar el nivel de resistencia a compresión.

Del análisis de resultados de la serie E y F, y al no obtener una mejora significativa en la resistencia a compresión, surge la dosificación para la serie G. Para esta serie se aumentó la relación a/c y pasta/agregado, se mantuvo constante la cantidad de cemento por metro cúbico de hormigón y se cambió el tipo de agregado grueso por un agregado triturado de procedencia local, ya que en todas las series anteriores se había utilizado agregado grueso tipo canto rodado.

En las series E y G, las probetas de una misma serie se compactaron de dos modos distintos, por impacto y por vibración, con la el fin de evaluar la incidencia del modo de compactación en la resistencia del hormigón. Además en la serie G se moldearon probetas para determinar la resistencia a tracción por flexión.

En la Tabla IV-9 y IV-10 se muestran las dosificaciones de las mezclas y las relaciones utilizadas desde la serie A hasta G comprendidas en la primera y segunda etapa experimental. Las relaciones propuestas en el diseño de las mezclas fueron las de pasta/agregado y agua/cemento, las restantes se calcularon para comparar con lo indicado en la bibliografía.

Tabla IV-9. Dosificaciones serie A hasta G (primera y segunda etapa experimental)

ID	Agua	Cemento	Ceniza volante	Agregado Grueso	T <sub>máx</sub>	Agregado Fino	Aditivo		Origen AG	Observaciones
Serie	[kg]	[kg]	[kg]	[kg]	[mm]	[kg]	[%]	[kg]		
A	126	449	-	1550	9,5		-	-	Río	Dosificación patrón
B	126	449	-	775	9,5	775	-	-	Río	50 % AG + 50 % AF
C	157	561	-	775	9,5	775	-	-	Río	Aumento 25% relación pasta/agregado
D	126	449	-	1550	9,5	-	0,8	3,59	Río	Serie A + Aditivo Hiperfluidificante
E	132	500	50	2100	9,5	-	3	16,5	Río	Aditivo Smart crete
F	132	500	50	2100	9,5	-	0,8	4,4	Río	Aditivo Hiperfluidificante
G	155	500	50	1493	9,5	-	3	16,5	Cantera	Aditivo Smart crete

Tabla IV-10. Relaciones utilizadas en las dosificaciones (primera y segunda etapa experimental)

ID Serie	Pasta /Agregado P/A	Agua/Cemento A/C	Agregado Grueso/Cemento AG/C	Agregado Fino/Agregado Grueso AF/AG
A	0,465	0,28	3,45	-
B	0,465	0,28	1,73	1
C	0,581	0,28	1,38	1
D	0,465	0,28	3,45	-
E	0,403	0,24	3,82	-
F	0,403	0,24	3,82	-
G	0,465	0,28	2,71	-

En la tercera etapa experimental, luego del análisis de la información que se obtuvo de las etapas anteriores, se plantearon nuevas dosificaciones dando lugar a las series H hasta N. Las nuevas mezclas se rediseñaron en pos de lograr niveles más altos de resistencia a compresión, sin perjudicar la porosidad del hormigón y por ende la permeabilidad del mismo, como así también optimizar el uso de los materiales componentes del hormigón.

En esta tercera serie de mezclas y con el fin de optimizar el uso de los materiales se disminuyó la cantidad de cemento y se agregó ceniza volante en reemplazo de parte del cemento. Por otro lado se varió la relación a/c y la relación pasta/agregado en función de los tamaños máximos utilizados. Se utilizó en esta etapa agregado grueso triturado de procedencia local, al igual que en la serie G. Para todas las series de esta etapa se utilizó el aditivo Smart Crete específico para hormigón poroso.

En las series H, I y J se mantuvo constante la relación a/c, variando para cada serie el tamaño máximo del agregado grueso (monogranular) y la relación pasta/agregado.

Al analizar la información arrojada en los ensayos de las tres series anteriores, se decidió rediseñar la dosificación y realizar tres nuevas mezclas, denominadas series K, L y M. En la serie K se disminuyó la relación a/c y se utilizó agregado grueso de tamaño máximo 12,5 mm. Por otro lado, con la finalidad de mejorar la trabajabilidad de la mezcla, se agregó arena fina Paraná en reemplazo del agregado grueso en una cantidad igual al 24 % en peso respecto del agregado grueso. Para la serie L, se utilizó la misma relación a/c que para la serie K y se bajó la relación pasta/agregado. Además se utilizó como agregado fino, arena gruesa de

procedencia local, reemplazando al agregado grueso, en una cantidad de 11% en peso respecto del agregado grueso de tamaño máximo 12,5 mm. Por último, para la serie M se mantuvieron los parámetros de la serie L, con excepción de los agregados, utilizándose como agregado grueso una mezcla de agregados de tamaño máximo 12,5 mm y 9,5 mm, en una proporción de 80% y 20% respectivamente y eliminándose el agregado fino.

En laboratorio para la serie K al realizar la mezcla se debió aumentar la cantidad de agua utilizada para mejorar la cohesión de la mezcla y cumplir con los requisitos en estado fresco, debido a esto la relación a/c se acercó a la de las series anteriores.

Debido a los resultados arrojados en las series anteriores, se diseñó una última mezcla denominada serie N, de iguales características a la serie K, pero agregando un 20% de arena fina Paraná con respecto al volumen total de agregado grueso y considerando al agregado fino como parte del volumen de pasta, aumentando esto la relación pasta/agregado.

En la tabla IV-11 y IV-12 se muestran las dosificaciones y relaciones utilizadas en cada una de las series de la tercera etapa experimental.

Tabla IV-11. Dosificaciones series H hasta N (Tercera etapa experimental)

ID	Agua	Cemento	Ceniza volante	Agregado Grueso	T <sub>máx</sub>	Agregado Fino	Aditivo		Procedencia del AG	Observaciones
Serie	[kg]	[kg]	[kg]	[kg]	[mm]	[kg]	[%]	[kg]		
H	128	350	50	1423.57	9,5	-	2	8	Cantera	Aditivo Smar Crete
I	128	350	50	1451.94	12,5	-	2	8	Cantera	Aditivo Smar Crete
J	128	350	50	1485.46	19	-	2	8	Cantera	Aditivo Smar Crete
K	125	350	50	1175.00	12,5	278.78	2,5	10	Cantera	AG 12,5 + 24 % AF
L	112	350	50	1323.28	12,5	139.39	2	8	Cantera	AG 12,5 + 11 % AF
M	112	350	50	1470.62	9,5/12,5	-	2	8	Cantera	AG 12,5 (80%) + AG 9,5 (20%)
N	112	350	50	1470.2	12,5	278.78	2,5	10	Cantera	AG 12,5 + AF (20% del vol AG)

Tabla IV-12. Relaciones utilizadas en las dosificaciones (Tercera etapa experimental)

ID Serie	Pasta/ Agregado (P/A)	Agua/Cemento (A/C)	Agregado Grueso / Cemento (AG/C)	AgregadoFino/ Agregado Grueso (AG/AF)
H	0,475	0,32	3,56	-
I	0,465	0,32	3,63	-
J	0,455	0,32	3,71	-
K	0,490	0,31	2,94	0,24
L	0,465	0,28	3,31	0,11
M	0,465	0,28	3,68	-
N	0,660	0,28	3,67	0,19

## IV.1.2. MÉTODOS Y RESULTADOS DE ENSAYO

### IV.1.2.1. ELABORACIÓN DE HORMIGONES

Todas las mezclas se elaboraron en hormigonera de eje inclinado en laboratorio y la colocación de materiales se realizó para todas las series con la misma secuencia de carga y homogeneización para evitar variaciones en las características del hormigón en estado fresco o endurecido. En la Figura IV-5 se puede observar la secuencia de carga de materiales y homogeneización de la mezcla.

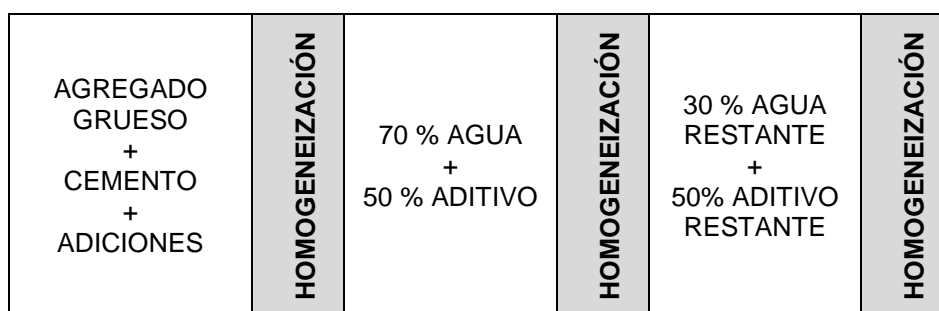


Figura IV-5. Secuencia de carga de materiales y homogeneización de la mezcla

Luego de la homogeneización de la mezcla, se prepararon las muestras para la realización de ensayos en estado fresco y moldeo de probetas para la realización de ensayos en estado endurecido.

---

#### IV.1.2.2. ENSAYOS SOBRE HORMIGÓN EN ESTADO FRESCO

##### ***ENSAYO DE ASENTAMIENTO DE TRONCO DE CONO DE ABRAMS INVERTIDO (NRMCA)***

En la Figura IV-6 se puede observar la secuencia de ensayo de Tronco de cono de Abrams invertido para la mezcla de la serie K.

En general, los resultados de este ensayo, al ser cuantitativos, sirvieron para corregir las dosificaciones posteriores y controlar parámetros de las mezclas en estado fresco.



Figura IV-6. Ensayo de Tronco de cono de Abrams invertido para la serie K

##### ***ENSAYO DE ASENTAMIENTO CON TRONCO DE CONO DE ABRAMS DE ACUERDO A NORMA IRAM 1536 (1978)***

El ensayo se realizó sólo a los fines de verificar un asentamiento nulo o máximo de 20 mm, que es lo recomendado por bibliografía para este tipo de hormigones. Es sólo una recomendación y no una un ensayo obligatorio. A demás, este ensayo permite evaluar a posterior la posible segregación de la pasta respecto del agregado total.

En la Figura IV-7 se puede observar el ensayo de tronco de cono y luego en la Figura IV-8 se aplana la masa de hormigón con una cuchara de albañil y se observa la cantidad y facilidad con que aparece la pasta cementicia.



Figura IV-7. Ensayo de asentamiento para la serie K



Figura IV-8. Evaluación de posible segregación de pasta en la serie K

### ***PESO DE LA UNIDAD DE VOLUMEN (ASTM C1688, 2014)***

La determinación del peso unitario del hormigón poroso de todas las mezclas se halló dentro del rango de 1700 a 1900 kg/m<sup>3</sup>, encontrándose dentro de los límites para este tipo de hormigón.

### **IV.1.2.3. ENSAYOS SOBRE HORMIGÓN EN ESTADO ENDURECIDO**

Se moldearon probetas cilíndricas para evaluar resistencia a compresión, porosidad y permeabilidad. Se moldearon probetas prismáticas para la determinación de la resistencia a tracción por flexión. Las probetas se realizaron de diferentes tamaños según el ensayo a realizar, como se presenta en la tabla IV-13.



Tabla IV-13. Dimensiones de probetas según ensayo a realizar

Forma	Dimensiones (cm)		Ensayo a realizar
	Diámetro	Altura	
Cilíndrica	10	20	Resistencia a compresión
	15	30	Porosidad
	15	30	Permeabilidad
Prismática	<b>Lado</b>	<b>Lado</b>	<b>Altura</b>
	15	55	15
			Resistencia a tracción por flexión

La compactación se realizó por impacto, utilizando un pisón similar al utilizado en el ensayo Proctor Estándar, con la finalidad de lograr presiones similares a las de campo que deben generar una presión de 4 a 7 t/m<sup>2</sup>.

El pisón utilizado tiene un peso de 4,54 kg y una altura de caída para cada golpe de 45,72 cm.

Las probetas cilíndricas se compactaron en 3 capas con 10 golpes cada una, logrando una presión aproximada de 5,8 t/m<sup>2</sup>.

En las series de mezclas E y G, se compactaron las probetas por dos métodos de compactación, por impacto y por vibrado, con la finalidad de comparar la influencia el modo de compactación sobre la resistencia a compresión del hormigón.

Dado que el hormigón poroso generalmente es utilizado en pavimentos, se realizó también el ensayo de tracción por flexión con carga en los tercios a los 28 días. Este ensayo se realizó sólo para dos series de mezclas, G y N. Se moldearon probetas prismáticas y se compactaron por impacto y vibración en la serie G y por impacto solamente para la serie N, con pisón en dos capas de 25 golpes cada una, distribuidos uniformemente.

Las probetas se mantuvieron en curado húmedo hasta la edad de ensayo. Para la determinación de resistencia a compresión se encabezaron las probetas con mezcla de azufre, según indica la norma IRAM 1553 (2008).

### **RESISTENCIA A COMPRESIÓN**

Los ensayos de resistencia a compresión se realizaron a las edades de 7 y 28 días, según norma IRAM 1546 (2013).

En la Figura IV-9 se presentan los resultados obtenidos en la primera y segunda etapa experimental, incluyendo las series A hasta G y en la Figura IV-10 los resultados de la tercera etapa experimental, serie H hasta N.

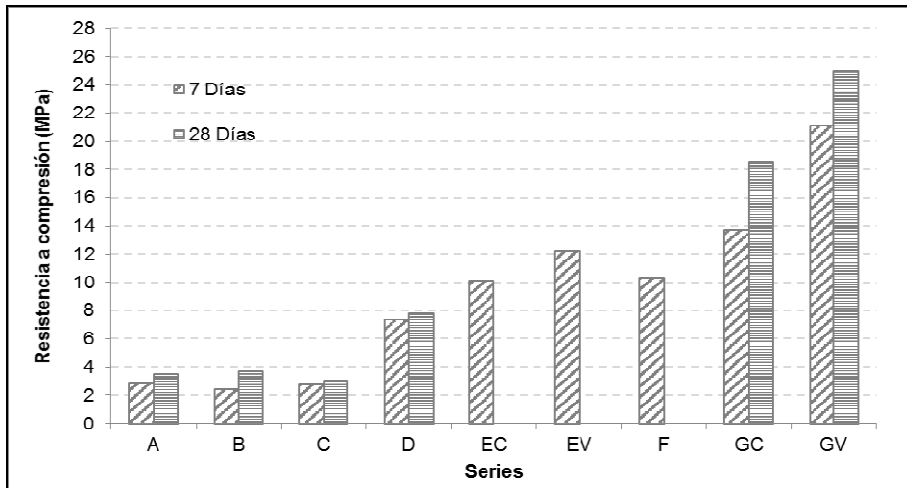


Figura IV-9. Resistencia a compresión serie A hasta G (MPa)

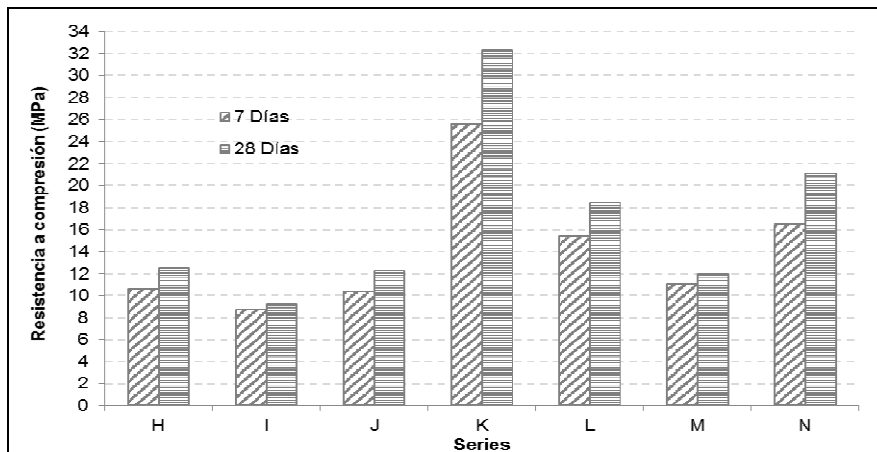


Figura IV-10. Resistencia a compresión serie H hasta N (MPa)

### **RESISTENCIA A TRACCIÓN POR FLEXIÓN**

Los ensayos de resistencia a tracción por flexión se realizaron a la edad de 28 días para las series G y N, siguiendo las recomendaciones de la norma IRAM 1547 (1992).

En la Figura IV-11 se muestran los resultados de resistencia a tracción por flexión para las series G y N. En donde para la serie G las probetas se compactaron por distintos métodos, siendo las probetas GC compactadas por impacto y las GV por vibración.

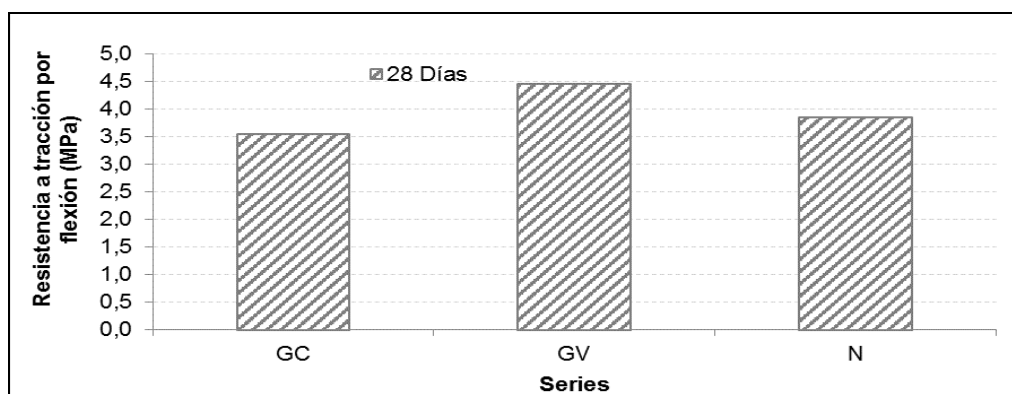


Figura IV-11. Resistencia a tracción por flexión a 28 días (MPa)

### **POROSIDAD**

Se utilizaron probetas cilíndricas de 15 de diámetro y 30 cm de alto inicial, a las que se les quitaron 5 cm debido a que se observó que esta última capa se encontraba alterada por la acción del enrasado durante el moldeo.

En la figura IV-12 se muestran la porosidad obtenida en cada una de las series.

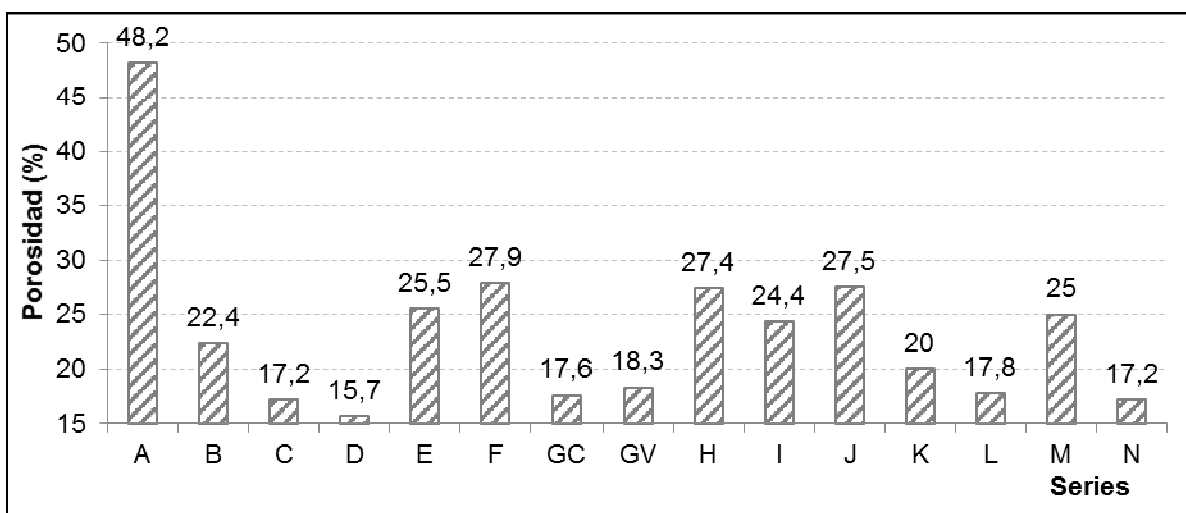


Figura IV-12. Porosidad (%)

### **COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD AL AGUA (K)**

Para determinar la permeabilidad de las distintas series se moldearon probetas de 15 cm de diámetro y 30 cm de altura inicial, las que se cortaron a 3,5 cm de cada extremo obteniendo probetas de 23 cm de altura aproximadamente. Se realizó este procedimiento para evitar la influencia del enrasado en el cálculo de permeabilidad.

Para cada probeta se determinó el tiempo (t) requerido para que el agua caiga de una altura inicial de 30 cm ( $h_1$ ) hasta una altura final de 10 cm ( $h_2$ ), este procedimiento se realizó 3 veces para cada probeta y luego se tomó el valor promedio de t.

En la Figura IV-13 se puede observar el permeámetro de carga variable utilizado en laboratorio para determinar la permeabilidad.



Figura IV-13. Equipo para medir permeabilidad

En la Figura IV-14 se muestran los valores del coeficiente de permeabilidad obtenido en la totalidad de las series.

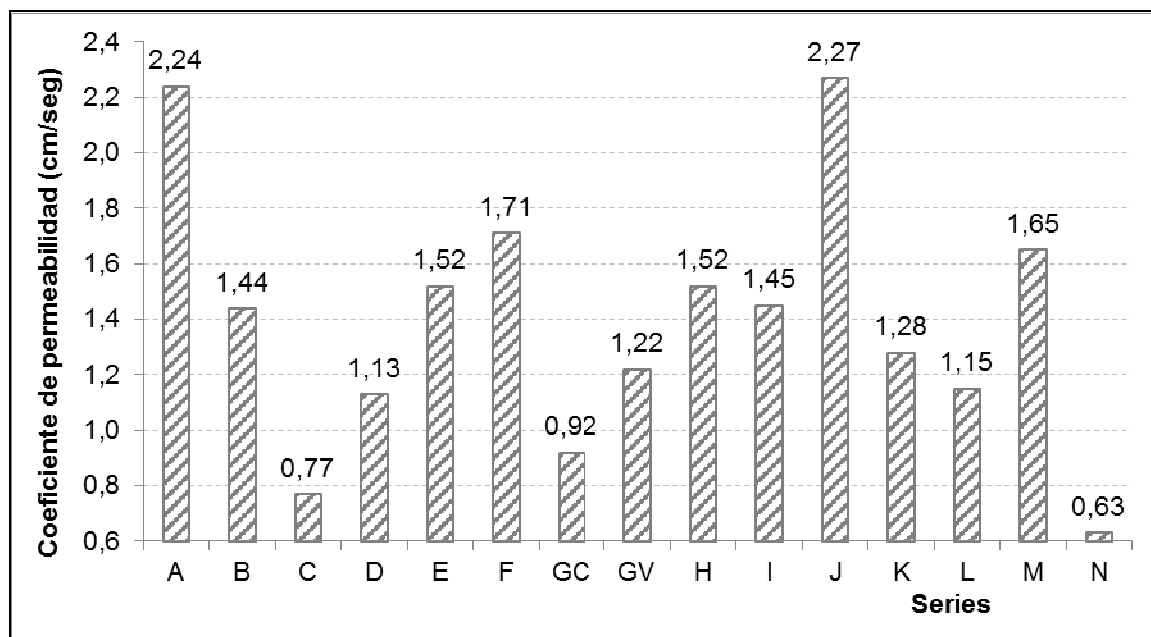


Figura IV-14. Coeficiente de permeabilidad (cm/seg)

## IV.2. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### IV.2.1. HORMIGÓN EN ESTADO FRESCO

#### **MÉTODO DE HAND-SQUEEZE (NRMCA, NATIONAL READY MIXED CONCRETE ASSOCIATION)**

Esta prueba permitió observar la consistencia del hormigón fresco. En función de los resultados obtenidos en las distintas series, se corrigió las dosificaciones para las distintas etapas experimentales.

Lograr la consistencia adecuada para el hormigón poroso no fue sencillo, ya que se trata de una mezcla de consistencia seca con otras particularidades tales como, escasa o nula presencia de agregado fino, agregado grueso de igual tamaño, relación pasta/agregado baja.

Del análisis cualitativo de la totalidad de las series, se observaron los siguientes resultados:

- Las mezclas con relación a/c entre 0,28 y 0,31 presentaron una consistencia adecuada con la incorporación de aditivos.

- Las mezclas con agregado grueso de tamaño máximo mayor y agregado fino en porcentajes no superiores al 30% con respecto al agregado grueso, presentaron una consistencia adecuada para iguales relaciones agua/cemento y pasta/agregado.
- Mejora significativa de la cohesión de la mezcla en las series donde se utilizó aditivo Smart Crete.

#### **IV.2.1.1. ENSAYO DE TRONCO DE CONO DE ABRAMS INVERTIDO (NRMCA)**

Este ensayo permitió evaluar la trabajabilidad de las mezclas y la posibilidad de segregación del hormigón.

Del análisis de resultados para las distintas series se pudo observar el siguiente comportamiento:

- La trabajabilidad de la mezcla fue aceptable para todas las series, mejorando en las mezclas con contenido de agregado fino.
- No se observaron problemas de segregación durante la realización de este ensayo, sino mezcla con mayor fluidez, como en la serie G.
- La segregación del hormigón no se presentó como un problema para rediseñar las dosificaciones de las distintas etapas, ya que se trató siempre de mezclas de consistencia seca con baja relación a/c.

#### ***ENSAYO DE ASENTAMIENTO CON TRONCO DE CONO DE ABRAMS DE ACUERDO A NORMA IRAM 1536***

El ensayo de asentamiento permitió ratificar el grado de consistencia de la mezcla obtenido en los ensayos anteriores, sabiendo que una de las características del hormigón poroso en estado fresco es su consistencia seca.

Por otro lado, este ensayo permitió evaluar cualitativamente la posibilidad de segregación de la mezcla reforzando así los datos obtenidos a través del ensayo de tronco de cono de Abrams invertido (NRMCA).

En ninguna de las series de mezclas realizadas en las distintas etapas experimentales se observó segregación, pero si un mayor asentamiento. En las

series de la segunda etapa experimental, E, F y G, se observaron asentamientos mayores a 10 cm, proporcionando una consistencia entre plástica y húmeda. Atribuyendo el mayor asentamiento a la baja relación pasta/agregado. Debido a esto, la tercera etapa experimental se aumentó la relación pasta/agregado no siendo inferior de 0,45.

#### ***PESO DE LA UNIDAD DE VOLUMEN (ASTM C1688:2014)***

En las mezclas realizadas el peso unitario tuvo una variación entre 1700 y 1900 kg/m<sup>3</sup>, ajustándose a lo recomendado por bibliografía.

### **IV.2.2. HORMIGÓN EN ESTADO ENDURECIDO**

#### ***RESISTENCIA A COMPRESIÓN***

De acuerdo a la bibliografía analizada la resistencia a compresión típica del hormigón poroso se encuentra alrededor de los 17 MPa, variando entre 3,5 y 28 MPa.

En la primera etapa experimental, series A hasta D, los resultados de resistencia a compresión fueron demasiado bajos, variando entre 2 y 8 MPa. En función de estos resultados se rediseñaron las mezclas para la segunda etapa experimental.

Las series E, F y G de la segunda etapa experimental, presentaron valores de resistencia a compresión más alto que los de la primera etapa, lográndose valores superiores a 24 MPa para la serie GV donde la compactación de las probetas se efectuó por vibración y mayores a 18 MPa para la misma serie en probetas compactadas por impacto.

En las series E y G se compactaron probetas por impacto y vibración, para evaluar la influencia del modo de compactación en la resistencia a compresión, observándose que en las probetas compactadas por vibración el valor de resistencia a compresión es mayor.

En la Figura IV-15 puede observarse una probeta de la serie G compactada por vibración. En la misma se detectó segregación de la pasta con escurrimiento hacia la parte lateral e inferior. Debido a este análisis se tomó como válido el

resultado de resistencia a compresión de las probetas compactadas por impacto para esta serie.



Figura IV-15. Segregación de la pasta probeta serie G.

Los resultados a compresión de la tercera etapa experimental, en principio no fueron los esperados. Luego, a partir de la serie K, se logró un aumento importante en los valores de resistencia a compresión, llegando a 32 MPa a la edad de 28 días para dicha serie. En la tercera etapa experimental se lograron valores de resistencia a compresión dentro de valores típicos a pesar de la disminución de la cantidad de cemento por metro cúbico de hormigón y el aumento de la relación pasta/agregado. Además se observó que mejoró la resistencia a compresión en las mezclas que contenían agregado fino.

### ***RESISTENCIA A TRACCIÓN POR FLEXIÓN***

Al realizar este ensayo se presentó como complicación el modo de compactación de la probeta prismática, ya que es muy difícil replicar en laboratorio la compactación de campo utilizada para pavimentos. En consecuencia, se decidió para la serie G compactar a las probetas por impacto y por vibración.

Los valores de resistencia a tracción obtenidos en las series G y N fueron acordes a los indicado por la bibliografía analizada, siendo en algunos casos superiores. El valor de la serie GV no se consideró a los fines del análisis de resultados ya que se observó segregación de la mezcla luego del compactado.



La determinación de la resistencia a tracción por flexión generalmente está sujeta a importante variabilidad, por lo que es común medir la resistencia a compresión y usar relaciones empíricas para estimar su valor.

En el diseño de pavimentos de hormigón convencional el American Concrete Institute (ACI) requiere la evaluación de la resistencia a tracción basada en flexión, debiendo usarse los requisitos de aceptación del ACI 325-9R. El ACI proporciona además a través de la ACI-325.12R-02 “Guía para el Diseño de Pavimentos con Juntas para Calles y Caminos Locales” recomendaciones sobre como estimar la resistencia a tracción por flexión en base de pruebas de resistencia a la compresión.

Al no existir una relación simple entre la resistencia del hormigón a la compresión y su resistencia a la tracción, los esfuerzos de los investigadores se han orientado hacia la determinación de una aceptable correlación entre estos dos tipos de solicitaciones.

La mayor parte de estudios realizados en los últimos años, determinan las relaciones entre los siguientes valores:

$f_c$  = Resistencia a la compresión

$f_t$  = Resistencia a la tracción por compresión diametral (tracción indirecta )

MR = Resistencia a la tracción por flexión ó Módulo de Rotura

\* Adam M. Neville

$MR \text{ (MPa)} = 0.399 (f_c)^{2/3}$

\* American Concrete Institute- Edición 2007 ACI 330R

$MR \text{ (MPa)} = 0.392 (f_c)^{2/3}$

\* Centro Técnico del Hormigón

$MR \text{ (MPa)} = 0.39 (f_c)^{0.65}$

Las relaciones presentadas anteriormente son utilizadas para pavimentos de hormigón convencional, de todos modos, se pretendió evaluar a través de las mismas los valores de resistencia a tracción por flexión para las series G y N. En la Tabla IV-14 se muestran los valores obtenidos durante el ensayo de Resistencia a Tracción por Flexión de la Norma IRAM 1547 (1192) y mediante la aplicación de la fórmula de correlación del ACI 330-R.

Tabla IV-14. Comparación de la Resistencia a tracción mediante ensayo y correlación con resistencia a compresión

Resistencia a tracción [MPa]			
ID Serie	IRAM 1547 28 días	Fórmula ACI 330-R	Variación entre IRAM 1547 y ACI 330-R
GC	3,55	2,74	77,2%
GV	4,46	3,35	75,1%
N	3,85	2,99	77,7%

Los valores obtenidos de resistencia a tracción por flexión mediante ensayo arrojaron valores más altos que los estimados mediante la fórmula de correlación con la resistencia a compresión de la misma mezcla.

### **POROSIDAD**

La porosidad es una de las características principales del hormigón poroso, siendo el valor adecuado entre 15 y 25 %. Para que una mezcla sea considerada porosa, debe tener como mínimo un 15 % de huecos, pero se recomienda que este contenido no supere el 25 % por la poca estabilidad de la mezcla.

Del análisis de resultados de la totalidad de la series se observó que ningún valor de porosidad cayó por debajo del límite inferior de 15 % y que en 5 de las 15 series realizadas se superó el valor de 25 % de porosidad, de esta manera la mayoría de las series arrojaron valores de porosidad adecuados.

### **PERMEABILIDAD**

La permeabilidad para hormigones porosos, según bibliografía consulta, oscila entre 0,2 a 5 cm/seg.

La permeabilidad de las mezclas, determinada a través del modelo de carga variable, resultó en la totalidad de las series dentro del rango recomendado.

En la Figura IV-16 puede observarse la relación entre porosidad (%) y permeabilidad (cm/seg) de las distintas series, verificándose la correspondencia entre ambas propiedades.

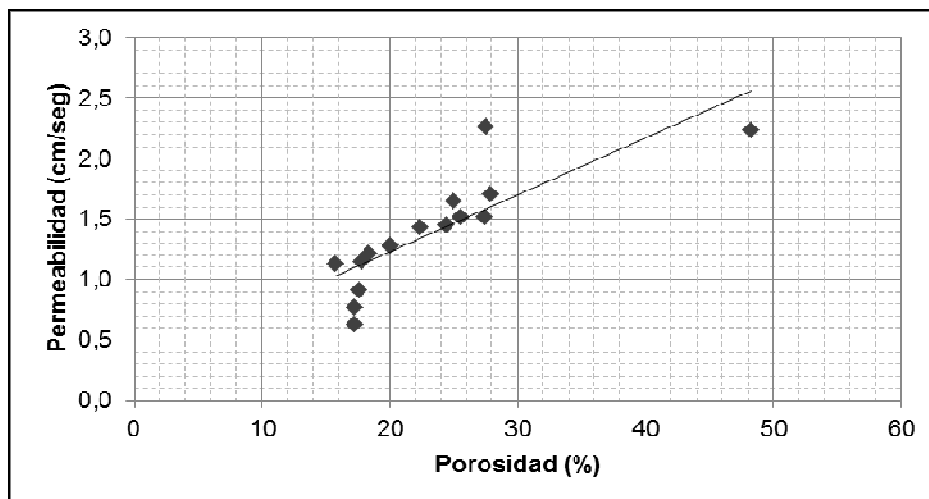


Figura IV-16. Variación de la permeabilidad según la porosidad del hormigón poroso

Navas Carro y Fernández (2011), en su investigación sobre diseño de mezclas de hormigón poroso, determinaron la permeabilidad de una serie de mezclas de a través del modelo de carga variable y de carga constante. Obteniendo como resultado que la permeabilidad obtenida utilizando el modelo de carga variable era 1,5 veces la obtenida utilizando el modelo de carga constante y la variación entre muestras disminuía utilizando este último.

Se observó además que en las series B, C, K, L y N la permeabilidad se encontró dentro de los valores medios o más bajos con respecto a la totalidad de las series. Posiblemente esto se deba a la utilización de agregado fino en las mezclas.

### IV.3. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En estado fresco, el uso de agregado fino, dentro de los límites recomendados mejoró la consistencia y trabajabilidad de las mezclas. Sin embargo, el uso de finos está limitado ya que podría presentar un efecto negativo en la permeabilidad.

Las mezclas con relación agua/cemento entre 0,28 y 0,31 y relación pasta/agregado superior a 0,45 presentaron características adecuadas en estado fresco con la incorporación de aditivo hiperfluidificante o específico para hormigón poroso como el Smart Crete.

El valor de resistencia a compresión se ubicó dentro de los valores típicos en la segunda y tercera etapa experimental, observándose un aumento de resistencia a compresión en concordancia con la utilización de agregado fino y agregado grueso triturado de tamaño máximo 12,5 mm.

La resistencia a tracción por flexión arrojó valores iguales o superiores a los recomendados por la bibliografía consultada. Se sugiere además, moldear y ensayar un número mayor de probetas en post de verificar la viabilidad en el uso de las fórmulas que correlacionan la resistencia a compresión y tracción por flexión, ya que no se trata de un hormigón convencional.

El hormigón de la serie K fue el que cumplió los requisitos indicados en la bibliografía en estado fresco y endurecido.

Se verificó la correspondencia entre porosidad y permeabilidad en la mayoría de las series, es decir, que a medida que el hormigón tiene mayor porosidad resulta más permeable. Por otro lado, la determinación de la permeabilidad debería plantearse en una nueva investigación utilizando el modelo de carga variable y carga constante para comparar los resultados obtenidos, debido a que según bibliografía consultada los resultados arrojados difieren hasta 1,5 veces dependiendo del modelo utilizado.

Con respecto al moldeo y compactación de probetas en laboratorio, no resultó sencillo reproducir la compactación utilizada en obra para este tipo de hormigón. Por este motivo se sugiere continuar las investigaciones con el fin de determinar el efecto que mayor energía de compactación puede tener sobre la resistencia a compresión, como así también sobre la permeabilidad del hormigón poroso. En futuras investigaciones podrían utilizarse para la realización de ensayos en estado endurecido testigos extraídos de pavimentos permeables con el fin de comparar resultados con los obtenidos en laboratorio.

## **CAPÍTULO V. – DISEÑO HIDRÁULICO E HIDROLÓGICO Y DISEÑO ESTRUCTURAL DEL PAVIMENTO**



## V.1. INTRODUCCIÓN

El diseño del pavimento permeable se basa en la capacidad del mismo para gestionar un determinado evento de precipitación. Es por ello que son dos los factores que determinan el espesor de diseño de pavimentos permeables: las propiedades hidrológicas e hidráulicas y las propiedades mecánicas.

El hormigón poroso utilizado en los sistemas de pavimento debe estar diseñado para soportar las cargas de tránsito previsto y contribuir positivamente a la estrategia de gestión de las aguas pluviales de un lugar específico. El diseñador selecciona las propiedades adecuadas del material, el espesor del pavimento adecuado, y otras características necesarias para cumplir los requisitos hidrológicos y las cargas de tránsito previstos simultáneamente. Se realizan análisis separados para los requisitos estructurales, hidráulicos e hidrológicos. De este análisis el mayor de los dos valores de espesor obtenido determinará el espesor de diseño final del pavimento.

## V.2. DISEÑO HIDROLÓGICO E HIDRÁULICO

Las herramientas fundamentales para realizar el diseño hidrológico e hidráulico de un pavimento permeable son: la lluvia de diseño y el volumen de agua afluente que recoge el pavimento.

La lluvia de diseño puede obtenerse mediante la sintetización de una tormenta de diseño (a partir de precipitaciones máximas y curvas IDF), o bien, puede emplearse la serie histórica de eventos. La elección de la tormenta de diseño depende del pavimento permeable, y se caracteriza por su duración (igual al tiempo de concentración de la cuenca, o en su caso, 5 minutos), volumen de precipitación, intensidad y periodo de retorno (habitualmente entre 2 y 10 años).

Es necesario destacar el efecto del cambio climático en el diseño de pavimentos permeables para la gestión de las aguas pluviales. Debido a que las grandes tormentas ocurren cada vez con mayor frecuencia, las normativas británicas proponen, por ejemplo, la introducción de un coeficiente de mayoración o “*factor de cambio climático*”, aplicado sobre los valores de intensidad de lluvia. No obstante no

existe un criterio estandarizado sobre que coeficiente aplicar, pues por ejemplo, “*The SUDS Manual*” sugiere un incremento de la intensidad entre el 5% y el 30%, en función del tiempo (Tabla V.1). Mientras, la Agencia Medioambiental (Environment Agency) y el Scottish Environment Protection Agency (SEPA), proponen aumentar la intensidad de las lluvias (de 1 hasta 100 años de periodo de retorno), en un 20% (García Haba, 2011).

Tabla V-1. Factores de cambio climáticos (García Haba, 2011)

Período	1990 - 2025	2025 - 2055	2055 - 2085	2085 - 2115
Factor	5%	10%	20%	30%

Respecto al volumen de agua afluyente que recoge el pavimento permeable, este se compone de la precipitación directa que cae sobre el mismo pavimento, más la escorrentía movilizada en superficies impermeables adyacentes que drenan hacia la estructura. Existen varios métodos para cuantificar la escorrentía, pero en el caso de pequeñas cuencas típicas de pavimentos permeables, se recomienda la aplicación del Método Racional (A.R.C., 2001).

Según Woods-Ballard et al., (2007), el diseño hidrológico e hidráulico de pavimentos permeables debe tener en cuenta cuatro aspectos:

- Estimar las características de permeabilidad de la capa de pavimento.
- Determinar el volumen de almacenamiento para alcanzar tasas de rendimiento adecuadas.
- Estimar la necesidad, y en ese caso cuantificar, la capacidad del drenaje longitudinal adicional.
- Gestionar la respuesta del pavimento ante eventos extremos de precipitación.

### V.2.1. PERMEABILIDAD DE LA CAPA DE PAVIMENTO

La permeabilidad de la capa de pavimento se determinó a través del coeficiente de permeabilidad  $k$  (Capítulo IV – Diseño de hormigón poroso). De acuerdo a la bibliografía este valor debe ser significativamente mayor que la máxima



intensidad de la lluvia de cálculo, pero generalmente este no suele ser un factor limitante en el diseño debido a que suele ser de un orden de magnitud superior a las máximas intensidades de lluvia esperables.

Hay que tener en cuenta que la permeabilidad del pavimento no se mantendrá constante en el tiempo, sino que disminuirá progresivamente hasta que se estabilice. Este fenómeno es debido a la colmatación, por lo que deberá tenerse en cuenta un factor de seguridad sobre la permeabilidad.

A la hora de definir el factor de seguridad, no existe un criterio unificado sobre qué valor emplear, y en qué condiciones, pues este debería determinarse en función del clima y la topografía de la zona de aplicación, y del mantenimiento de la infraestructura.

Actualmente pueden encontrarse en la literatura algunos factores de seguridad recomendados por diferentes autores, como Woods-Ballard et al., (2007), quienes recomiendan un factor de seguridad de 10. Por su parte, Rodríguez Hernández (2008), cita que el factor de seguridad debe ser como mínimo del orden de 10, pudiendo considerarse ordenes mayores como 100 o incluso 1.000 al disminuir la esperanza de mantenimiento. En Chile, el Ministerio de Vivienda y Urbanismo (1996), emplea un factor de seguridad en función de las propiedades del agua y las condiciones de mantenimiento, y recomienda calcularlo según el procedimiento de la Figura V-1 (García Haba, 2011).

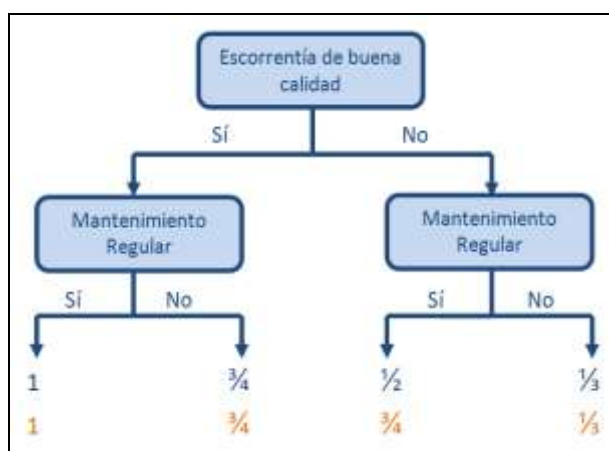


Figura V-1. Proceso de cálculo del factor de seguridad frente a colmatación para un pavimento continuo (azul) y discontinuo (naranja). (Adaptado de M.I.N.V.U., 1996).

## V.2.2. VOLUMEN DE ALMACENAMIENTO

Desde el punto de vista de la cantidad del agua, el criterio de diseño habitual de un pavimento permeable es la recarga de acuíferos y/o reducción de escorrentía.

Respecto al volumen que es necesario gestionar según el criterio de reducción de escorrentía, U.S.EPA (1980), propone capturar y eliminar el volumen de lluvia asociado al percentil 80% de la serie de precipitaciones, y el percentil 90% en zonas con alta capacidad de infiltración.

En el Reino Unido, el diseño hidráulico de los SUDS se realiza en base a los criterios de cantidad y calidad de agua. Según Interpave (2010), los principales requisitos que deben tenerse en cuenta en el diseño de pavimentos permeables son:

- Laminar y reducir el volumen de escorrentía. Consiste en evitar la formación de escorrentía generada por todos los eventos de precipitación mayores o igual a 5 mm.
- Eliminar los contaminantes que arrastra la escorrentía gestionando un volumen de calidad de agua ( $V_t$ ).

Existen dos métodos para estimar el volumen de calidad (Woods-Ballard et al., 2007):

- *Método de precipitación variable (Variable rainfall depth method)*. Se basa en una fórmula empírica desarrollada en función del grado de impermeabilidad de la cuenca, del uso del suelo y de la altura de precipitación correspondiente al percentil 90% de la serie de precipitaciones del año medio. En función de los parámetros empleados, el volumen de calidad oscila entre los 10 mm y 20 mm de escorrentía distribuidos sobre la cuenca. Se calcula según Ecuación V-1.
- *Método de precipitación fija (Fixed rainfall depth method)*. Se trata de un método más sencillo, puesto que considera una altura de precipitación fija, basada en la experiencia del método anterior. Los valores típicos de precipitación varían entre 11 mm y 15 mm, y es el método utilizado en Inglaterra y en Gales. Para obtener el volumen de

calidad, basta con aplicar la precipitación únicamente en las zonas impermeables de la cuenca.

$$V_t \left( \frac{m^3}{ha} \right) = 9 \cdot D \cdot \left[ \frac{SOIL}{2} + \left( 1 - \frac{SOIL}{2} \right) \cdot I \right] \quad \text{Ecuación V-1}$$

Donde:

$V_t$  = Volumen de calidad.

SOIL = Parámetro de uso del suelo, obtenido del “Flood Studies Report”, “The Wallingford Procedure” o “The Wallingford Procedure for Europe”.

I = Fracción de la cuenca que es impermeable.

D = Altura de precipitación.

Una vez conocido el volumen que se quiere almacenar en el pavimento permeable, es posible obtener el espesor de la sub-base del pavimento permeable, además del área permeable necesaria. El cálculo puede afrontarse de dos maneras diferentes, planteando un balance de volúmenes, o bien, mediante un modelo matemático de simulación.

El proceso necesario para estimar el espesor de la sub-base a partir del balance de volúmenes es el siguiente:

$$V_{almacenado} = V_{afluente} - V_{efluente}$$

$$V_{almacenado} = (V_{escorrentía} + V_{lluvia}) - (V_{infiltración} + V_{desagüe})$$

$$V_{almacenado} = A_{permeable} \cdot (n_{sub-base} \cdot h_{sub-base} + n_{base} \cdot h_{base} + n_{superficie} \cdot h_{superficie})$$

Considerando que el coeficiente de escorrentía es 1, que la capacidad de campo es 0:

$$V_{lluvia} = I_{lluvia} \cdot A_{permeable} \cdot t_{lluvia}$$

$$V_{escorrentía} = I_{lluvia} \cdot A_{impermeable} \cdot t_{lluvia}$$

$$V_{infiltración} = f_{suelo} \cdot A_{infiltración} \cdot t_{infiltración}$$

$$V_{desagüe} = Q_{desagüe} \cdot t_{desagüe}$$

Siendo:

$$t_{desagüe} \leq t_{lluvia} \leq t_{infiltración}$$

Se tiene que:

$$\begin{aligned} V_{almacenado} &= A_{permeable} \cdot (n_{sub-base} \cdot h_{sub-base} + n_{base} \cdot h_{base} + n_{superficie} \cdot h_{superficie}) \\ &= I_{lluvia} \cdot t_{lluvia} \cdot (A_{permeable} + A_{impermeable}) \\ &\quad - (f_{suelo} \cdot A_{infiltración} \cdot t_{infiltración} + Q_{desagüe} \cdot t_{desagüe}) \end{aligned}$$

Considerando:

$$A_{infiltración} = A_{permeable}$$

$$t_{infiltración} = t_{lluvia}$$

$$n_{base} \cdot h_{base} + n_{superficie} \cdot h_{superficie} = 0$$

$$V_{desagüe} = 0 \text{ (no existe desagüe)}$$

El espesor de la sub-base en las condiciones de funcionamiento más desfavorables (sin desagüe), resulta:

$$h_{sub-base} = \frac{t_{lluvia}}{n_{relleno}} \cdot \left( I_{lluvia} \cdot \frac{A_{permeable} + A_{impermeable}}{A_{permeable}} - f_{suelo} \right)$$

Por otra parte, considerando

$$A_{infiltración} = A_{permeable}$$

$$V_{afluente} = V_{tratamiento}$$

$$n_{sub-base} \cdot h_{sub-base} + n_{base} \cdot h_{base} = n_{relleno} \cdot h_{relleno}$$

$$V_{desagüe} = 0 \quad (\text{No existe desagüe})$$

Se obtiene el área permeable necesaria para un determinado volumen de tratamiento (por ejemplo, el volumen de calidad de agua), también en las condiciones de funcionamiento más desfavorables, como:

$$A_{permeable} = \frac{V_{tratamiento}}{(n_{relleno} \cdot h_{relleno} + n_{superficie} \cdot h_{superficie}) + f_{suelo} \cdot t_{infiltración}}$$

### V.2.3. CAPACIDAD DE DRENAJE LONGITUDINAL ADICIONAL

Es posible que en ciertas ocasiones no sea viable infiltrar en el suelo el volumen previamente almacenado en la sub-base, por lo que deben tomarse medidas que permitan evacuar el agua almacenada. La propia naturaleza impermeable del suelo, su compactación para conseguir una densidad determinada, o su impermeabilización intencionada para aprovechar el volumen de agua almacenado, limitan potencialmente su capacidad de infiltración. En estos casos está recomendado la utilización de drenes longitudinales (ejecutados mediante tuberías perforadas o drenes franceses), con el fin de suplementar la propia capacidad de infiltración del suelo, actuando como un punto de control, regulando los caudales de salida del sistema.

El diseño del drenaje longitudinal se realiza de manera que sea capaz de evacuar la escorrentía del interior de la sub-base. Actualmente no existen directrices estandarizadas en cuanto a la capacidad con que deben diseñarse los drenes de salida, aunque un rango típico utilizado en el diseño varía entre 1 y 5 l/s/ha. No

obstante, para un correcto funcionamiento del drenaje longitudinal, su capacidad de desagüe debe ser mayor que la máxima capacidad de infiltración en el sistema.

La mayoría de las normativas y manuales consultados consideran el drenaje de salida como un orificio, dado por la siguiente Ecuación V-2.

$$Q = C_d \cdot A \cdot (2 \cdot g \cdot h)^{0.5} \quad \text{Ecuación V-2}$$

Donde:

Q = Caudal desaguado a través del orificio (m<sup>3</sup>/s).

Cd = Coeficiente de descarga.

A = Sección transversal del orificio (m<sup>2</sup>).

g = Aceleración de la gravedad (m/s<sup>2</sup>).

h = Máxima altura del agua sobre el orificio (m).

Otra manera de estimar la capacidad del drenaje de salida, es la que propone la guía de diseño "*The SUDS Manual*", (Woods-Ballard et al., 2007) como la capacidad de drenaje longitudinal a través de la propia sub-base en función de su disposición. En el caso de una sub-base horizontal, el máximo caudal por unidad de superficie que es posible evacuar, viene dado por la Ecuación V-3.

$$q = k \cdot \left(\frac{h}{b}\right)^2 \quad \text{Ecuación V-3}$$

Donde:

q = Caudal por unidad de superficie (m/s).

k = Coeficiente de permeabilidad de la sub-base (m/s).

h = Espesor de la sub-base (m).

b = Distancia media entre drenes, (m).

Dicha expresión tiene en cuenta la distancia media entre drenes, en el caso de considerar más de uno.

Mientras que si la sub-base cuenta con cierta pendiente, el caudal de drenaje a través de esta se obtiene a partir de la Ley de Darcy (Ecuación V-4).

$$Q = A \cdot k \cdot i \quad \text{Ecuación V-4}$$

Donde:

$Q$  = Caudal a través de la sub-base ( $m^3/s$ ).

$A$  = Sección transversal del flujo ( $m^2$ ).

$k$  = Coeficiente de permeabilidad de la sub-base ( $m/s$ ).

$i$  = Gradiente hidráulico, aproximado a la pendiente de la sub-base (adimensional).

#### **V.2.4. GESTIÓN DE EVENTOS EXTREMOS DE PRECIPITACIÓN**

El diseño de los pavimentos permeables debe considerar y comprobar para qué eventos extremos se agota la capacidad de almacenamiento, dando lugar por tanto, al comienzo de la escorrentía superficial. Estos sistemas siempre deben incluir elementos de emergencia para los casos en que la capacidad de la infraestructura se vea superada por eventos mayores al evento de diseño.

No debe permitirse el almacenamiento temporal de la escorrentía por encima de la superficie del pavimento, sobre todo cuando exista riesgo de obstrucción de los huecos de la superficie. Por tanto, al ser los pavimentos permeables una técnica de infiltración, deben incluir en el diseño aquellos elementos de emergencia frente a inundaciones, como tuberías o desagües, que viertan hacia zonas verdes adyacentes. Solamente en el caso de no poder infiltrar total o parcialmente en el terreno el volumen de agua requerido, se dispondrán tuberías para coleccionar los caudales desbordados (García Haba, 2011).

### **V.3. DISEÑO ESTRUCTURAL**

El diseño estructural de un pavimento permeable se centra básicamente en la definición del espesor mínimo de la estructura. En este caso, los criterios de diseño deben ser aquellos que proporcionen la capacidad portante adecuada a la categoría de tránsito que deba soportar el pavimento, sin que este sufra deformaciones importantes.

Aunque el procedimiento de diseño depende de la superficie permeable empleada, siempre se contemplan los siguientes pasos:

1. Establecer la categoría de tránsito.
2. Comprobar la calidad del suelo para asegurar la capacidad portante de la estructura. En caso de ser necesario, mejorar la capacidad portante.
3. Seleccionar el tipo de sub-base y su espesor.
4. Seleccionar el tipo y espesor de la superficie permeable.

La calidad del suelo viene determinada según su capacidad portante, y se mide a través del valor del índice CBR (The Californian Bearing Ratio). En concreto, el suelo debe ofrecer un soporte mínimo con un CBR mayor que 5, conforme aumenta el tránsito considerado. Sin embargo, en suelos cuyo CBR es inferior a este valor, puede mejorarse su capacidad portante mediante una ligera compactación, aunque va en detrimento de la infiltración (Virginia DCR Stormwater, 2011).

Respecto a la base y a la sub-base, la primera consiste generalmente en una capa de grava de 13 mm de diámetro, y suele tener un espesor de entre 25 mm y 50 mm. La segunda está formada normalmente por grava de un diámetro comprendido entre 20 mm y 75 mm, y el espesor mínimo que establecen la mayoría de manuales y normativas para asegurar la funcionalidad del firme desde el punto de vista estructural, es de 15 centímetros.

Según Woods-Ballard et al., (2007), el diseño estructural debe tener en cuenta ciertas consideraciones, como:

La mayoría de normas y recomendaciones de diseño de secciones de pavimento están referidas a materiales convencionales (relativamente densos e impermeables).

Debe asegurarse de que no se produzcan pérdidas de resistencia ni rigidez en las capas inferiores, especialmente cuando estas capas se encuentren saturadas.

Los geotextiles aumentan la resistencia a la fricción producida entre cada una de las capas, por lo que deben diseñarse cuidadosamente con el objetivo de evitar o minimizar la pérdida de resistencia a estos esfuerzos.



Hay que tener especial cuidado en la elección del material granular para evitar un posible lavado de finos que provoquen una pérdida de la resistencia de las capas.

Debe tenerse en cuenta un aumento del espesor de la sub-base en casos donde se prevean fenómenos de heladas.

La gran mayoría de normativas y manuales de diseño recomiendan varios espesores en función de la calidad de la explanada y de la categoría del tránsito que debe soportar el pavimento permeable, basados en diferentes experiencias con este tipo de pavimentos.

Por ejemplo, en Estados Unidos, U.S.EPA (1980), establece unos espesores mínimos totales (superficie y sub-base) para un pavimento permeable continuo, en función de tres categorías de tránsito e índices CBR mayores de 5, entre 127 mm y 305 mm (Tabla V-2).

Tabla V-2. Mínimos espesores de un pavimento permeable para varias condiciones de tránsito, Adaptado de U.S.EPA1980 (García Haba, 2011).

Categoría de tránsito	Descripción	CBR			EAL <sup>1</sup>
		≥ 15	10 - 14	6 - 9	
1	Tránsito Ligero	127	178	229	≤ 5
2	Tránsito ligero-medio (máx 1.000vpd <sup>2</sup> )	152	203	279	6 - 20
3	Tránsito medio (máx 3.000 vpd <sup>2</sup> )	178	229	305	21 - 75

<sup>1</sup> Carga equivalente por eje media diaria (80 kN)

<sup>2</sup> Vehículos por día

En el Reino Unido, Woods-Ballard et., al (2007), proponen una serie de espesores de la sub-base, en función de 3 categorías de tránsito y de las características de la explanada entre 200 y 450 mm.

Interpave (2010), recomienda en el caso de pavimentos de adoquines, un espesor de superficie fijo de 130 mm, y un espesor de sub-base variable, en función del índice CBR, según el destino de las aguas filtradas y considerando 6 categorías de tránsito.

En los casos de infiltración completa y parcial al terreno subyacente, y un CBR ≥ 5 en la explanada, el espesor de la sub-base recomendado está comprendido entre los 250 mm y 450 mm. Mientras que los sistemas sin infiltración al terreno subyacente y con un CBR ≥ 5, el espesor varía entre los 400 mm y 600 mm.

En Chile, M.I.N.V.U. (1996), propone los siguientes espesores mínimos de acuerdo a la experiencia del Servicio de Vivienda y Urbanismo (SERVIU).

Tabla V-3. Espesores mínimos de las capas de un pavimento permeable considerados por M.I.N.V.U. 1996 (García Haba, 2011).

Capa	Espesor mínimo (cm)
Superficie	
Aceras	4
Calles de bajo tránsito	5
Base	15
Sub-base granular	15

## V.4. SECUENCIA CONSTRUCTIVA

Se presentan a continuación las recomendaciones constructivas de la National Ready Mixed Concrete Association (2010).

### V.4.1. PREPARACIÓN DE BASE Y SUB-BASE

La uniformidad del suelo de apoyo es un criterio clave para colocar pavimento permeable. Al igual que en otros tipos de pavimentos, las grietas de camiones y otras irregularidades deben ser alisadas y compactadas antes de la colocación. Se recomienda a menudo una compactación del suelo de apoyo a una densidad mínima de 90% a 95% de la densidad teórica (por AASHTO T 180), sin embargo, el aumento de la densidad del suelo de apoyo disminuye su permeabilidad.

Los pavimentos permeables contienen un mínimo de agua y alta porosidad, por lo que se debe tener cuidado de que el pavimento no se seque antes de tiempo. Por lo tanto el subsuelo debe estar húmedo (sin agua libre) antes de la colocación.

### **V.4.2. DOSIFICACIÓN Y MEZCLA**

Las propiedades especiales del hormigón poroso requieren un control más estricto sobre la dosificación y mezcla. En particular, el contenido de agua del hormigón poroso se limita a una cantidad predeterminada con el fin de proporcionar una adecuada resistencia y permeabilidad, y evitar que la pasta fluya fuera de los agregados y el cierre la estructura de poros. El nivel de humedad de los agregados y la absorción de los mismos deben ser monitorizados cuidadosamente ya que pueden resultar perjudiciales para la mezcla. En algunas ocasiones, pequeñas modificaciones en el contenido de agua puede ser necesario en el lugar de trabajo para lograr la consistencia adecuada, sin embargo, esto debe hacerse con cuidado porque las adiciones de agua en obra pueden ser difícil de controlar. El contenido de agua correcto proporcionará una mezcla con un brillo metálico. Una prueba de peso de la unidad de volumen es necesario para ofrecer garantías de dosificación de la mezcla, debiendo encontrarse el peso de la unidad de volumen dentro de valores típicos, tales como, 1600 kg/m<sup>3</sup> y 2000 kg/m<sup>3</sup>, y los valores medidos en obra, en general, deben encontrarse dentro del 5% del peso de la unidad de diseño.

Las proporciones de cemento y agregados serán establecidos por las pruebas y por la experiencia con materiales disponibles localmente, de acuerdo a las variaciones en las características de los mismos.

Los equipos a utilizar para la elaboración de mezclas son los mismos que para hormigones convencionales, aunque el tiempo de mezclado podrá ampliarse en comparación con el hormigón convencional.

### **V.4.3. TRANSPORTE**

Debido a que el hormigón poroso tiene un bajo contenido de agua, se requiere especial atención durante el transporte y colocación. Su bajo asentamiento puede hacer la descarga desde el camión mezclador sea más lento que para el hormigón convencional. Una mezcla de hormigón poroso debe ser descargada completamente dentro de una hora después de la mezcla inicial. El uso de aditivos químicos retardadores de fragüe puede prolongar el tiempo de descarga una hora y media o más. Las altas temperaturas del ambiente y las condiciones de viento deben tomarse en cuenta.

#### **V.4.4. COLOCACIÓN Y COMPACTACIÓN**

El ancho aconsejado de aplicación fluctúa entre 3 y 5 metros, al igual que los pavimentos convencionales de hormigón. Las guías laterales son similares a las convencionales, diferenciándose por la inclusión de un listón de madera adherido sobre éstas para establecer un sobre espesor de compactación. Una vez que el hormigón ha sido esparcido y nivelado, estos listones son removidos a modo de poder compactar la mezcla con un rodillo del ancho total de la losa. Los listones empleados pueden llegar a ser de 3/4 pulgada, dependiendo de la consistencia de la mezcla y el espesor del pavimento (FCPA, 1990).

El sistema de vibrado empleado es del tipo "strike off", o de impacto superficial. Se recomienda en la mayoría de los casos usar un vibrador mecánico en el modo más lento posible. Si en caso contrario, se implementan frecuencias de vibrado altas, lo más probable es que el hormigón se sobre compacte, alterando así la estructura de huecos y por ende la permeabilidad. Inmediatamente después del vibrado de impacto, se debe utilizar un rodillo pesado, del ancho total de la losa, para compactar la mezcla a la altura de las guías. Dependiendo de la consistencia de la mezcla y de la temperatura ambiente, puede necesitarse más de una pasada del rodillo, el que debe generar una presión de 4 a 7 t/m<sup>2</sup>, y que, además, debe ser limpiado y aceitado antes de cada pasada. La experiencia muestra que las juntas longitudinales son más susceptibles a descalce. Una compactación adicional en esta zona es necesaria para evitar la aparición de estas fallas. El paso del rodillo debe terminarse no más allá de 20 minutos después de la vibración de impactos. Debido a la textura abierta de la mezcla, la pérdida de humedad se produce a gran velocidad y el inicio del fraguado es muy rápido. Un rodillado tardío va en desmedro de la terminación de la superficie. Si el hormigón ha fraguado, el rodillo no compactará al nivel deseado. Además, un rodillado tardío produce agrietamiento superficial del mortero e incrementa la posibilidad de aparición futura de fallas, como descalces o grietas mayores.

Usualmente no es necesario realizar operaciones de terminación después de la compactación, no siendo recomendables operaciones como pulimiento, pues puede obstruir o sellar los poros de la superficie disminuyendo su permeabilidad. No obstante, debe corregirse cualquier defecto superficial inmediatamente en forma manual.

### **V.4.5. JUNTAS**

Las juntas requeridas en los pavimentos porosos difieren a las convencionales, debido a que el pavimento poroso tiene menos de un tercio de la retracción de un hormigón convencional. El espaciamiento de las juntas transversales es de aproximadamente 15 a 20 metros. En este caso, los equipos convencionales no son aplicables, debiendo utilizarse un rodillo especial con una hoja filosa.

La experiencia ha mostrado que las juntas de dilatación térmica no son necesarias en estos pavimentos (Paine, 1992).

### **V.4.6. CURADO Y PROTECCIÓN**

La estructura abierta y rugosa de la superficie del hormigón poroso expone más superficie de la pasta de cemento a la evaporación, por lo que el curado es aún más esencial que en el hormigón convencional. El agua es necesaria para las reacciones químicas del cemento, y es fundamental para el hormigón poroso que el curado comience rápidamente.

Debido a que los pavimentos de hormigón poroso no exudan, pueden tener una alta propensión a la fisuración por retracción plástica. De hecho, el curado para las losas y pavimentos permeables comienza antes de que el hormigón sea colocado, la sub-base debe ser humedecida para evitar que absorba la humedad del hormigón. Después de la colocación, el proceso de curado recomendado es aplicación de niebla a través de rociadores seguida de cobertura con láminas de plástico, donde las láminas deben permanecer en su lugar durante al menos siete días. Se recomienda asegurar las láminas de plástico con maderas, barras de refuerzo u otros métodos. El curado debe iniciarse tan pronto como sea posible después de la colocación, compactación, y realizado de juntas. Las experiencias demuestran que el curado debe comenzar en un plazo máximo de 20 minutos después de estos procedimientos.

#### **V.4.7. APERTURA AL TRÁNSITO**

Dependiendo el uso del pavimento será la apertura al tránsito, por lo general se recomienda que los pavimentos no se pongan en servicio hasta siete días posteriores a su construcción. Se recomienda además un curado continuo del pavimento hasta su apertura al tránsito.

#### **V.5. CONSERVACIÓN Y MANTENIMIENTO DE PAVIMENTOS PERMEABLES**

Uno de los inconvenientes que se pueden presentar en los pavimentos permeables es que necesitan un mantenimiento desde la construcción que evite la llegada de sedimentos a la superficie, pues éstos pueden obstruir sus poros.

Para evaluar la capacidad de infiltración de un pavimento permeable, el método normalmente utilizado en la mayor parte de los países del mundo, es el de medir su permeabilidad mediante la utilización de permeámetros. Uno de los más utilizados y normalizado en varios países, es el permeámetro LCS (Figura V-2), que mide el tiempo que tarda en descender el nivel de agua entre dos marcas, evacuando el agua a través de un pequeño orificio. A pesar de que el permeámetro LCS permite obtener resultados adecuados de permeabilidad para comparar distintos estados de la drenabilidad de un pavimento, no es muy representativo de la forma real en que se presentan las lluvias. Además la experiencia ha mostrado que sus mediciones no son muy sensibles al estado del pavimento después de una limpieza, pudiendo los efectos parecer muy pequeños, nulos e incluso negativos; por ello se hizo necesario desarrollar sistemas de medición complementarios. Uno de estos dispositivos se denomina permeámetro de Zarauz (Figura V-2) que, a diferencia del LCS deja caer el agua al pavimento desde una cierta altura, filtrándose libremente sobre este, lo cual representa de mejor forma la realidad.



Figura V-2. Permeámetro LCS (derecha) y permeámetro Zarauz (izquierda).

Con este método se toman dos tipos de medidas: tiempo total de la desaparición del agua de la superficie y máxima distancia recorrida por el agua antes de su penetración.

Para realizar las operaciones de limpieza, varios son los modelos de máquinas que se utilizan, centrándose la mayor parte en máquinas autopropulsadas con un equipo de lavado-succión trasero con agua, de alta potencia y anchura de 2,5 metros. El agua es, en un gran porcentaje, recuperada y filtrada para continuar siendo utilizada en el proceso.

La presión de trabajo, la velocidad de circulación de la máquina y el número de pasadas adecuan la intensidad de la limpieza a la necesidad de limpieza del pavimento.

Valores experimentales muestran que en algunos casos la pérdida de permeabilidad que se puede producir en el primer año es recuperable en un 50% y que, manteniendo la frecuencia anual, las pérdidas del segundo año se pueden recuperar en un 70%.

En relación a la periodicidad con que debe realizarse la limpieza, parece razonable hacerlo una vez al año y después de las lluvias prolongadas, que hayan podido ablandar al máximo la suciedad depositada y así alcanzar los mejores resultados con el menor esfuerzo. De forma general, finales de invierno o principios

de primavera suelen ser las épocas más recomendables. En todo caso, la evolución de la permeabilidad debe marcar la pauta (Castro et al., 2009).



## **CAPÍTULO VI – ESTACIONAMIENTO CON PAVIMENTO PERMEABLE DE HORMIGÓN POROSO**



## **VI.1. INTRODUCCIÓN**

Este capítulo tiene como finalidad el diseño de un pavimento permeable de hormigón poroso para ser utilizado en uno de los estacionamientos de la Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional Córdoba.

El estacionamiento pertenece al área de Posgrado, Laboratorio de Materiales y al centro de investigación CINTEMAC.

El diseño del pavimento puede realizarse como se explicó en el capítulo anterior atendiendo criterios hidráulicos e hidrológicos y estructurales. En este caso se realizó de acuerdo a criterios estructurales y no hidráulicos ya que no existen limitaciones en cuanto a caudales de vertidos de agua pluvial al sistema de drenaje urbano de la ciudad de Córdoba para este tipo de proyecto.

El comportamiento y respuesta hidráulica del pavimento de hormigón poroso para el clima local será analizado con el modelo de simulación matemática público SWMM 5.1 de la EPA de los Estados Unidos. Este modelo, además de contemplar la escorrentía urbana y los procesos de flujo, integra un módulo de cálculo específico para SUDS denominado LID (Low Impact Development). La versatilidad de este modelo de simulación, y su condición de libre distribución y código abierto, le ha permitido convertirse en uno de los más empleados en muchos países, como Estados Unidos, Canadá, Australia y en Europa, con el fin de abordar numerosos estudios centrados en el análisis de la problemática de la cantidad y la calidad de agua (Huber and Dickinson, 1992).

## **VI.2. CARACTERÍSTICAS DEL ESTACIONAMIENTO Y DEL PAVIMENTO PERMEABLE**

### **VI.2.1. LOCALIZACIÓN Y CARACTERÍSTICAS DEL ÁREA EN ESTUDIO**

El estacionamiento se encuentra ubicado dentro del predio de la Universidad Tecnológica Nacional de la ciudad de Córdoba. El acceso al estacionamiento en estudio se realiza por avenida Maestro López como se indica en la Figura VI-1.



Figura VI-1. Ubicación del estacionamiento dentro de la UTN-FRC.

El estacionamiento se emplaza dentro de un área de 4074.1 m<sup>2</sup>, donde 381,50 m<sup>2</sup> pertenecen a edificios, 694,60 m<sup>2</sup> a espacios verdes y 2998 m<sup>2</sup> al estacionamiento propiamente dicho. El estacionamiento tiene forma rectangular y capacidad para 111 vehículos. En la Figura VI-2 se observa la planta general de la zona de estacionamiento a diseñar.



Figura VI-2. Planta general del área de estacionamiento a diseñar.

Como se mencionó anteriormente, el estacionamiento se emplaza dentro del predio de la UTN-FRC y de acuerdo a lo expuesto por la Dirección de Planeamiento Físico de la Facultad Regional Córdoba esta zona no recibe aportes de aguas pluviales de sectores aledaños. Los desagües pluviales de este sector serán evacuados al drenaje urbano de la calle Maestro López.

### VI.3. DISEÑO DEL PAVIMENTO PERMEABLE DE HORMIGÓN POROSO.

Como ya se explicó en el capítulo II, los pavimentos permeables se encuentran dentro de las técnicas de drenaje urbano sustentable, cuyo objetivo principal es el fomento de la retención y la infiltración de las escorrentías en el origen del sistema. Se utilizará pavimento permeable para el estacionamiento como alternativa al pavimento impermeable convencional, con la finalidad de reducir el volumen y la velocidad de la escorrentía.

Existen diferentes clasificaciones para los pavimento permeables, ya sea según la tipología del pavimento o el destino de las aguas filtradas. En este caso

según la tipología del pavimento utilizaremos pavimento permeable de hormigón poroso, de acuerdo a la clasificación realizada por Ferguson (2005) en Estados Unidos. En cuanto al destino de las aguas filtradas, se adoptó un pavimento permeable con infiltración parcial al terreno subyacente (Figura VI-3). Esta elección surgió de la escasa o limitada capacidad de infiltración del terreno, debiendo completarse la infraestructura con drenes longitudinales en las capas inferiores que evacuan el exceso hacia la red convencional.

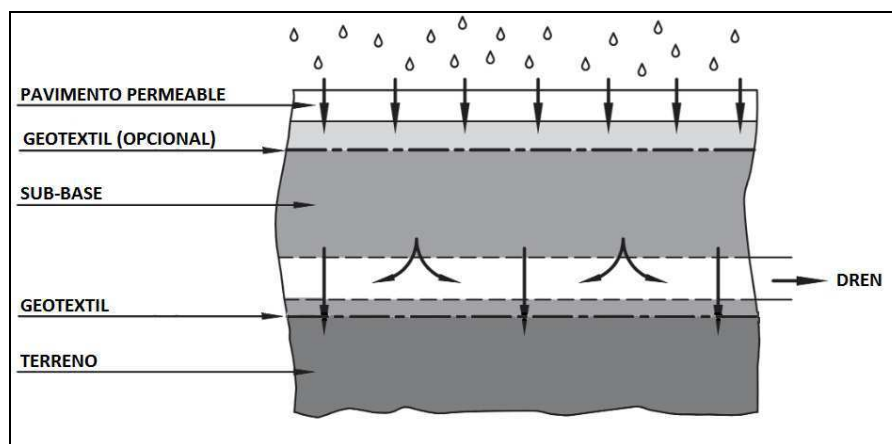


Figura VI-3. Infiltración parcial al terreno subyacente (Fuente: García Haba, 2011)

El diseño del pavimento de hormigón poroso se realizó atendiendo criterios estructurales, debido a la falta de limitación de caudales de vertido al sistema de drenaje urbano por parte del municipio de la ciudad para este tipo de proyecto. No obstante, posteriormente se presenta el estudio del comportamiento del pavimento permeable para el clima local verificando el volumen de almacenamiento y escorrentía.

De acuerdo a las recomendaciones bibliográficas se diseñó el pavimento permeable de hormigón poroso para el estacionamiento en estudio, Figura VI-4.

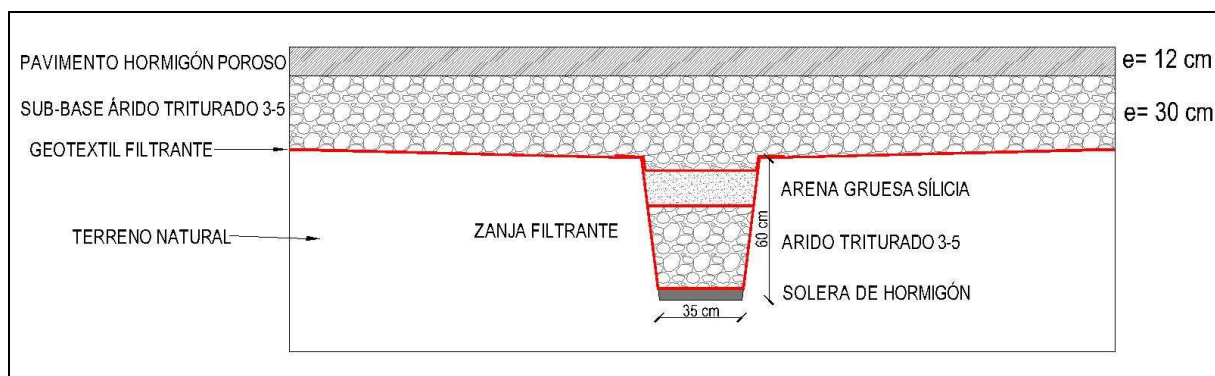


Figura VI-4. Sección pavimento permeable de hormigón poroso para estacionamiento

La disposición de las capas y espesor del hormigón poroso fueron tomados de las recomendaciones de empresas dedicadas a la provisión de este material en otros países y que usan en las mezclas el mismo aditivo utilizado en esta investigación. La empresa Concretos Especiales S.R.L en Chile, comercializa el aditivo Smart Crete y ejecuta obras con hormigón poroso. Por otro lado la empresa Construcciones Sustentables S.A, comercializa el Ecocreto, el cual es una marca registrada en México y EE.UU.

El espesor de la sub-base se diseño en función de las recomendaciones bibliográficas detalladas en el capítulo anterior, proponiendo un espesor de 30 cm. Este espesor verifica el espesor mínimo para pavimento permeable indicado por U.S. EPA (1980) de acuerdo a la categoría de tráfico e índice de CBR. El espesor adoptado es el recomendado para tráfico medio e índice de CBR entre 6 y 9.

De acuerdo a lo expuesto anteriormente, la sección adoptada para el pavimento de hormigón poroso del estacionamiento es la siguiente:

- Pavimento de hormigón poroso de 12 cm de espesor a realizarse con el hormigón dosificado en esta investigación, con la serie K que mejores resultados presentó en los parámetros evaluados.
- Sub-base de árido triturado tamaño 30-50 mm de 30 cm de espesor.
- Geotextil de filtro y separación, MacTex de Maccaferri.

Se completó el diseño de la sección del pavimento permeable con un dren inferior para permitir evacuar el agua no infiltrada en el terreno natural, hacia el sistema de drenaje pluvial urbano (Figura VI-4).



El dren propuesto, es un dren tipo francés, formado por una solera de hormigón, grava tamaño 30-50 mm y arena gruesa como filtro.

Se propone para la conexión del dren inferior al sistema de drenaje urbano, la utilización de un caño de pvc perforado de 160 mm de diámetro protegido con geotextil. Este caño unirá la zanja filtrante con una cámara de desagüe cerrada ubicada en el ingreso al estacionamiento, de la cual se derivará el agua a través de dos caños de pvc de 100 mm de diámetro. En la Figura VI-5 puede observarse la ubicación del dren en el estacionamiento.

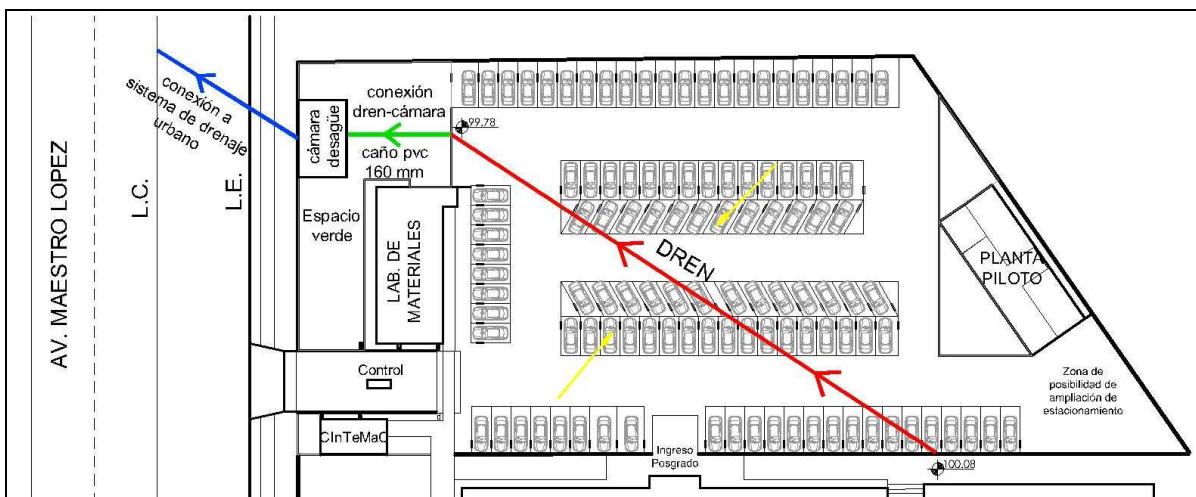


Figura VI-5. Ubicación del dren en el estacionamiento

#### VI.4. CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA.

Las características hidrológicas e hidráulicas de la estructura del pavimento permeable se definen a través de la caracterización de cada uno de los componentes de la sección. No obstante, para el correcto funcionamiento del sistema deben caracterizarse también las condiciones de contorno, como por ejemplo, la cuenca de aporte.



---

### VI.4.1. CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA

Un pavimento permeable debe ser capaz de gestionar un determinado evento de precipitación. Por ello, el dimensionamiento hidráulico de los pavimentos permeables, debe tener como punto de partida la caracterización del régimen pluviométrico de la zona de aplicación de los mismos.

Es por lo tanto necesario abordar una caracterización completa del proceso temporal de precipitación, con el objetivo de identificar y caracterizar los eventos de precipitación estadísticamente independientes que constituyen el input de la simulación matemática que se aborda posteriormente.

Para conocer la lluvia de diseño se utilizó el modelo IDT (Intensidad, Duración, Tiempo de retorno) que se basan en factores de frecuencia. El modelo con el que se calculan las  $i_{dT}$  en Córdoba es el modelo DIT para predicción de lluvias máximas en diseño hidrológico. Se utilizaron las curvas  $i_{dT}$  para la Provincia de Córdoba, Argentina, donde se proyecta el estacionamiento de pavimento permeable.

Debido a la necesidad de definir crecidas de proyecto y a la insuficiencia estadística de registros pluviométricos, se evaluó indirectamente el caudal mediante modelos lluvia-descarga, alimentados por eventos hipotéticos críticos. Estas lluvias de diseño parten de un vínculo esencial entre los rasgos esenciales de la precipitación: la función i-d-T. Como la probabilidad de ocurrencia de una lluvia depende de su persistencia, hace falta establecer la relación entre tres variables: la intensidad,  $i_{d,T}$ , la duración,  $d$ , y el período de retorno,  $T$ . (Caamaño Nelli, 2003).

Caamaño Nelli y García (1997) dedujeron la ecuación VI.1 que permite calcular la intensidad de lluvia para una duración de lluvia y período de retorno determinado teniendo en cuenta una serie de constantes propias de cada zona pluviométrica.

$$\ln i = A \cdot \varphi_y - B \cdot \delta_y + C \quad \text{Ecuación VI.1}$$

Donde:

A, B, y C son constantes, que en este caso corresponden a la estación Córdoba Observatorio, que es la estación más próxima a la zona del estacionamiento a diseñar.

$$A = 0,337$$

$$B = 0,159$$

$$C = 5,193$$

$\varphi_y$  = Factor de frecuencia de Chow

$\delta_y$  = Factor de persistencia

$$\varphi_y = 2,584458 \cdot (\ln T)^{0,375} - 2,252573 \quad \text{Ecuación VI.2}$$

$$\delta_y = (\ln d)^{5/3} \quad \text{Ecuación VI.3}$$

Por lo tanto, se adoptó una duración de 5 minutos y un periodo de retorno de 5 años de acuerdo a recomendación bibliográfica citada en el Capítulo V, y a partir de la Ecuación VI.2 y Ecuación VI.3 se tiene:

$$\varphi_y = 0,837$$

$$\delta_y = 2,210$$

Entonces según la Ecuación VI.1 se tienen las intensidades de lluvia para un T de 5 años y para intervalos de duración de un minuto según lo expresado en la Tabla VI-1. En la última columna de la Tabla VI-1 se observa la intensidad de lluvia para cada intervalo de duración incrementada en un 20% según la recomendación de EPA para considerar el cambio climático.

Tabla VI-1. Intensidades de lluvia para un periodo de retorno de 5 años.

DURACIÓN (min)	Ln $i_{d,T}$	i (mm/h)	Intensidad afectada por el coeficiente de cambio climático
			i (mm/h)*1,2
1,00	5,48	238,7	286,38
2,00	5,39	218,9	262,70
3,00	5,29	198,1	237,78
4,00	5,20	181,4	217,74
5,00	5,12	167,9	201,52

---

## VI.4.2. CARACTERÍSTICAS DE LA CUENCA DE APORTE

Los parámetros de cuenca permiten definir las propiedades tanto geométricas como hidrológicas e hidráulicas de la propia cuenca de drenaje. El estacionamiento propiamente dicho corresponde a una cuenca de 2998 m<sup>2</sup> de superficie y una pendiente media del 0,4%.

La cuenca en estudio se considera totalmente permeable, puesto que coincide exactamente con el estacionamiento vehicular ejecutado con hormigón poroso, cuyo coeficiente de rugosidad de Manning es 0,017 según bibliografía.

Por otra parte, se ha considerado que no se produce almacenamiento en depresión dada la condición de total permeabilidad de la superficie de la cuenca. El modelo de infiltración usado para la modelación de la percolación es el de Horton debido a que es el que mejor se ajusta acorde a los datos iniciales recogidos.

El pavimento de hormigón poroso tiene un espesor de 120 mm, una pendiente media de 0,4%, una tasa de infiltración máxima de 4608 mm/h obtenida del ensayo de percolación en laboratorio afectada de un coeficiente de seguridad de 10. El coeficiente de seguridad se adoptó teniendo en cuenta las recomendaciones de Rodriguez Hernandez (2008) considerando esorrentía de mala calidad y sin mantenimiento del pavimento.

Además, el pavimento de hormigón tiene una relación de vacíos de 0,21 y un factor de colmatación nulo, una constante de decaimiento de 2 l/s y un tiempo de secado de 8 días (fijados según las recomendaciones de Rossman, 2004).

En relación a las propiedades de la sub-base se tiene un espesor de 300 mm, una porosidad del 40%, una relación de vacíos de 0,67. El terreno natural tiene una conductividad hidráulica de 1mm/h y un factor de colmatación nulo.

La Dirección de Planeamiento Físico de la Facultad Regional Córdoba brindó información sobre el tipo de suelo de la zona de emplazamiento del estacionamiento, a partir del perfil de suelo obtenido para estudios de fundación. En función de dicho estudio, se observó que hasta los dos metros de profundidad se tiene un suelo del tipo Limo Arcilloso (CL-ML) con un nivel de saturación de 39,5%.

Conociendo el tipo de suelo, se obtuvo del libro Hidrología Aplicada (Chow, et al., 1994) el parámetro de infiltración a través del Método de Green-Amp, resultando para un suelo Arcilloso-Limoso una permeabilidad saturada de 1 mm/h.

Por su parte, el drenaje interno, es del tipo descarga por orificio con un valor de  $n$  de 0,5 y un caudal máximo de 1,8 mm/h. Por lo tanto se obtiene el coeficiente de descarga a partir de la Ecuación VI.4 que es la que emplea el programa SWMM para estimar el caudal de drenaje por unidad de área del pavimento permeable.

$$Q = C \cdot (h - H_d)^n \quad \text{Ecuación VI.4}$$

Donde:

$C$  = Coeficiente de descarga en mm/h

$h$  = altura de agua almacenada en mm

$H_d$  = altura del desagüe en mm

$n = 0,5$

Por lo tanto se tiene un coeficiente de descarga  $C$  de 0,104 mm/h.

### **VI.4.3. CARACTERISTICAS DEL PAVIMENTO PERMEABLE**

#### **VI.4.3.1. Propiedades del hormigón poroso local**

Siendo la finalidad principal de esta investigación contribuir al control de la escorrentía superficial mediante el uso de pavimentos de hormigón poroso, es que se expresan a continuación la dosificación y propiedades obtenidas en la etapa experimental para el hormigón poroso local.

La dosificación adoptada surge del análisis de resultados de la etapa experimental, tomándose como adecuada la dosificación de la serie K. En la Tabla VI-2 se muestra la dosificación para la serie K y en la Tabla VI-3 las relaciones utilizadas para la dosificación.

Tabla VI-2. Dosificación de materiales en kg. para un m<sup>3</sup> de hormigón poroso

ID serie	Agua	Cemento	Ceniza volante	A. Grueso	A. Fino	Aditivo
K	125	350	50	1175	279	10

Tabla VI-3. Relaciones serie K

ID serie	Pasta/Agregado P/A	Agua/Cemento A/C	A. Grueso/Cemento AG/C	A. Fino/A. Grueso AG/AF
K	0,49	0,31	2,94	0,24

Las características del hormigón en estado endurecido de la serie K se presentan en la tabla VI-4.

Tabla VI-4. Propiedades en estado endurecido serie K

Propiedad	Valor
Resistencia a compresión 28 días [MPa]	32,3
Porosidad [%]	20
Permeabilidad [cm/seg]	1,28
Relación de vacíos (relación de vacíos = porosidad/(1-porosidad))	0,25

#### VI.4.4. DREN DE SALIDA

El dren inferior consiste en una zanja drenante o dren francés, formado por una solera de hormigón, un relleno de gravas de tamaño 30-50 mm, y un filtro de arena. En el caso del estacionamiento se contempló la colocación de un tubo dren (Ø160 mm), convenientemente protegido con geotextil, uniendo la zanja drenante con una cámara de inspección. A su vez, dos caños de Ø100 mm cada uno que unen la cámara de inspección con la instalación del desagüe pluvial urbano

#### VI.5. MODELO SWMM 5.1

El estacionamiento se ha conceptualizado en SWMM mediante una cuenca, que solamente recoge las aguas de lluvia caídas en la misma, puesto que carece de cuencas adyacentes que supongan aportes externos. La escorrentía generada se inyecta en un nodo ficticio, circula por una conducción y sale finalmente del sistema

para conectarse a la red de drenaje municipal. En la Figura VI-6 se representa esquemáticamente la conceptualización de la zona de estudio en SWMM.

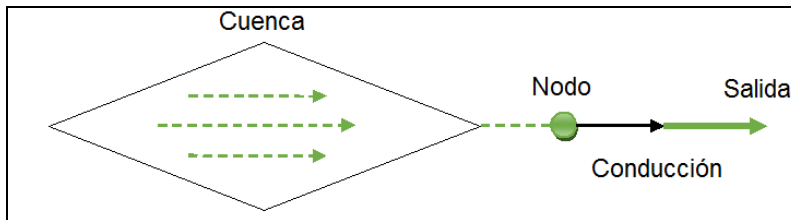


Figura VI-6. Conceptualización de la zona de estudio en SWMM

En este caso, la técnica empleada corresponde a un pavimento poroso, representado como una sucesión vertical de capas con unas determinadas propiedades. Durante la simulación, SWMM realiza un balance sobre cada capa, permitiendo conocer el movimiento del agua y su almacenamiento entre éstas. En la Figura VI-7 se representan esquemáticamente los procesos y las líneas de flujo características en un pavimento poroso.

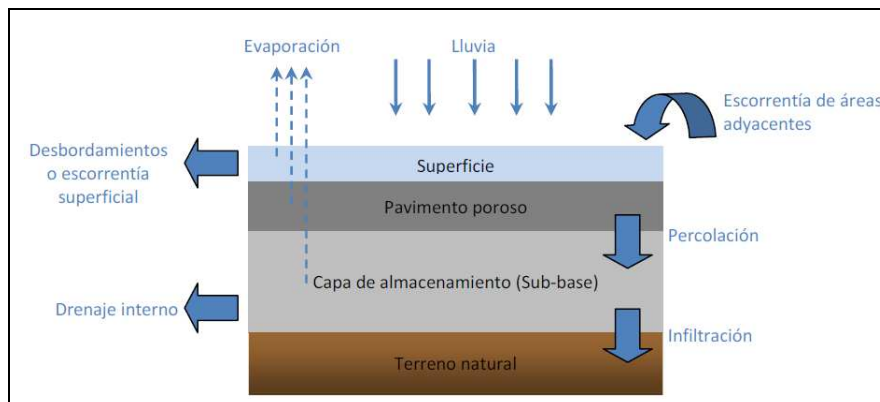


Figura VI-7. Esquema conceptual de flujos en un pavimento poroso

El esquema de funcionamiento de un pavimento poroso en SWMM puede representarse mediante dos nudos divisores y dos unidades de almacenamiento, como se muestra en la Figura VI.8

La lluvia que cae sobre el pavimento poroso se moviliza en primer lugar hacia el Divisor 1, donde la intensidad de precipitación se compara con la tasa de percolación del pavimento poroso.

Si la tasa de percolación del pavimento poroso supera la intensidad de precipitación, la lluvia filtrada por el pavimento poroso es dirigida a la Unidad de Almacenamiento 1, que tiene una superficie igual al área del pavimento poroso y una profundidad igual a la profundidad del almacenamiento (sub-base), afectada por la porosidad.

Una vez agotada la capacidad de almacenamiento de la Unidad 1, el exceso de flujo se dirige al Divisor 2. El caudal de entrada al Divisor 2 se compara con la conductividad hidráulica saturada del terreno natural, de modo que si el caudal de entrada es igual o inferior a la tasa de infiltración hacia el terreno natural, se dirige a la Unidad de Almacenamiento 2 (el suelo natural).

Si el caudal de entrada al Divisor 2 excede la tasa de infiltración hacia el terreno natural, se dirigirá hacia el sistema de drenaje, y de éste a la salida del sistema.

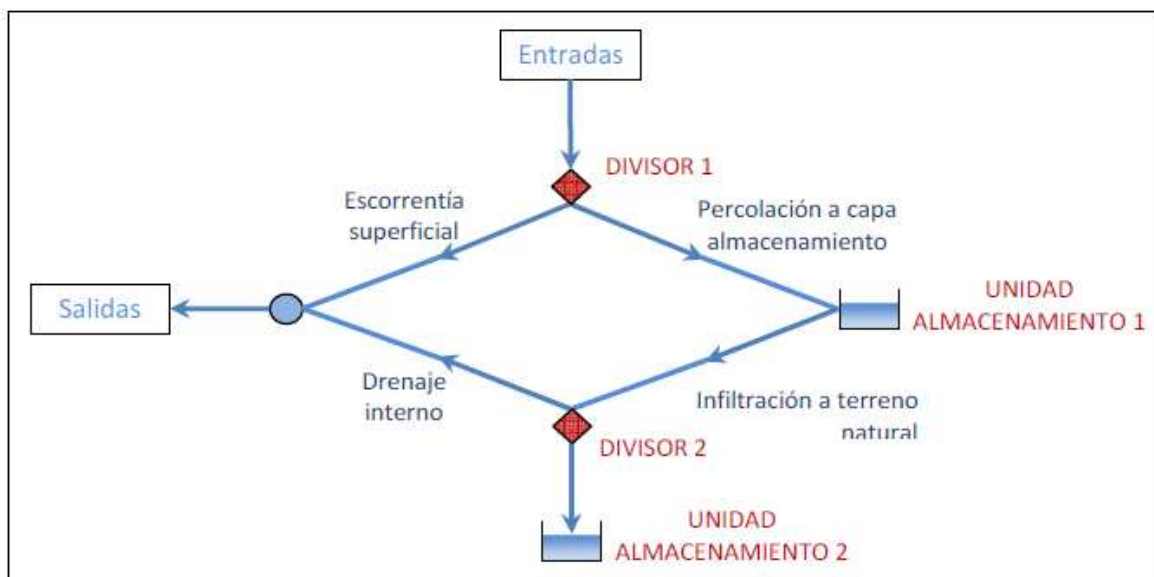


Figura VI-8. Conceptualización de un pavimento poroso en SWMM

De entre todos los procesos que caracterizan el funcionamiento de un pavimento poroso, y desde el punto de vista de la simulación matemática, hay que

destacar la importancia de la escorrentía superficial, la percolación e infiltración y el drenaje interno, sin olvidar también el importante papel que juega el transporte hidráulico en el sistema. Es por tanto necesario conocer la formulación en la que SWMM se basa para modelar estos procesos, y así entender mejor tanto el funcionamiento como los resultados de un pavimento poroso tras la simulación.

### **VI.5.1. MODELACIÓN DEL ESTACIONAMIENTO CON SWMM**

El programa Storm Water Management Model de la EPA es un programa informático que permite calcular el impacto de la escorrentía en áreas urbanas y en desarrollo y evaluar la eficacia de las estrategias de atenuación.

Cuenta con un módulo LID, que permite modelar diferentes técnicas de drenaje urbano sostenible. Este módulo es el que se utilizó para modelar la respuesta hidrológica del pavimento permeable frente a un evento de lluvia.

Con los datos obtenidos en laboratorio para el hormigón poroso fabricado, determinación del régimen pluviométrico y datos facilitados por la Dirección de Planeamiento Físico de la Facultad Regional Córdoba acerca del estacionamiento propuesto para el estudio del comportamiento del pavimento permeable para el clima local, se llevó a cabo una simulación con el programa SWMM 5.1.

Además de realizar la simulación del comportamiento del pavimento de hormigón poroso se llevó a cabo el pre-dimensionado y simulación del comportamiento de un pavimento de hormigón convencional. Esto permitió comparar el escurrimiento para cada una de las simulaciones, verificando los beneficios del pavimento de hormigón poroso, ya que el escurrimiento es nulo en comparación a un pavimento de hormigón convencional. Este control en origen de las aguas de lluvia que permite el pavimento de hormigón poroso disminuye notablemente el riesgo de inundaciones urbanas, mejora la calidad de las aguas evacuadas e infiltradas, mejorando el nivel freático y contribuyendo a un correcto funcionamiento de los sistemas de drenaje urbanos tradicionales existentes.

Cabe destacar que tanto la simulación de la respuesta del pavimento de hormigón poroso como de hormigón convencional se realizaron utilizando valores hidrológicos, hidráulicos y estructurales aportados por investigaciones realizadas en



laboratorios, análisis bibliográficos y aportes de la Dirección de Planeamiento Físico de la Facultad Regional Córdoba.

El correcto diseño de un pavimento permeable debe apoyarse en estudios previos, como estudios hidrológicos, hidráulicos y geotécnicos, que permitan definir correctamente las condiciones de contorno del problema al que se enfrenta el proyectista. Además, el diseño debe buscar un equilibrio entre criterios de diseño y criterios económicos, de manera que se conforme finalmente la mejor solución técnicamente viable.

A continuación en la Tabla VI-5 se presentan los parámetros y valores del pavimento permeable y el evento de lluvia cargados en la simulación.

Tabla VI-5. Parámetros de la cuenca y del evento hidrológico para pavimento permeable de hormigón poroso.

Parámetros de la cuenca		
Superficie [m <sup>2</sup> ]	2998	
Pendiente media [%]	0,4	
Manning	0,017	
Modelo de infiltración	Horton	
Parámetros LID		
Hormigón permeable	Espesor [mm]	120
	Tasa de percolación [mm/h]	4608
	Pendiente [%]	0,4
	Relación de vacíos	0,25
Sub-base	Espesor [mm]	300
	Conductividad hidráulica [mm/h]	1,00
	Relación de vacíos	0,67
Drenaje interno	Coefficiente de descarga [mm/h]	0,104
	Exponente "n"	0,5

### Modelo Horton:

Weber (2015) demostró que el modelo de mejor desempeño en el área de emplazamiento del estacionamiento lo presenta el Modelo de Infiltración de Horton (1939) para suelos loéssicos.

Por lo tanto se adoptaron los siguientes parámetros de infiltración (Weber & Reyna, 2016)

$$f_0 = 50,33 \text{ mm/h.}$$

$$f_b = 17,57 \text{ mm/h.}$$

$$k = 4,02 \text{ 1/h.}$$

Donde:

$f_0$ : tasa inicial de infiltración

$f_b$ : tasa base de infiltración (capacidad mínima de infiltración),

$k$ : parámetro de forma o constante de decaimiento

En la Figura VI-9 se observa los parámetros de Horton cargados en la simulación.

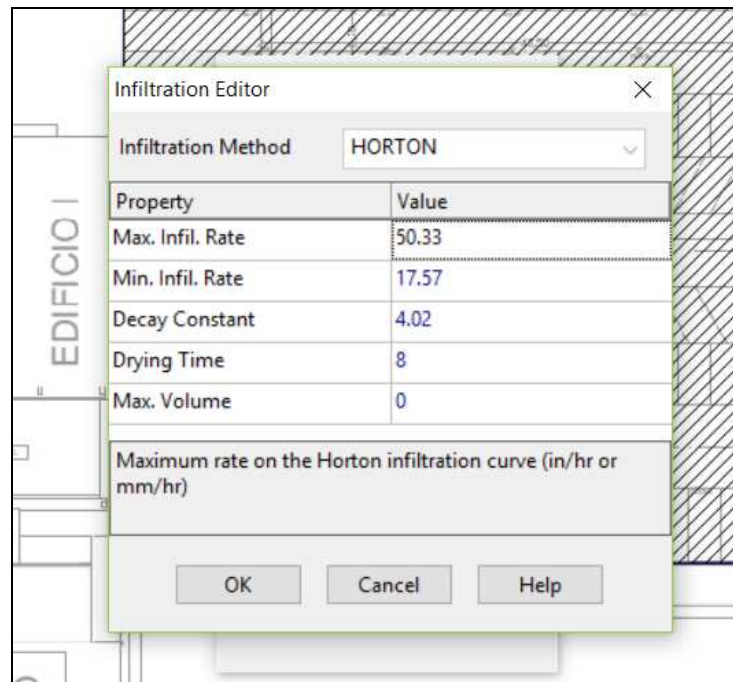


Figura VI-9. Parámetros Horton

Para el cálculo de la lluvia de diseño se empleó la distribución de la precipitación en sextiles de acuerdo a las IDF de la Estación Córdoba-Observatorio. Teniendo para una duración de 5 minutos y un periodo de retorno de 5 años, los valores de intensidad son los expresados en la Tabla VI-1.

A continuación en la Figura VI-10 se observa el área de la cuenca modelada. En la Figura VI-11 se presenta como se introduce en la modelación la lluvia de

diseño en forma de distribución de intensidades mediante un hietograma de diseño obtenido por el método de bloque alterno. Finalmente en la Figura VI-12 se presentan los parámetros LID para el Sistema de drenaje sostenible de pavimento permeable.

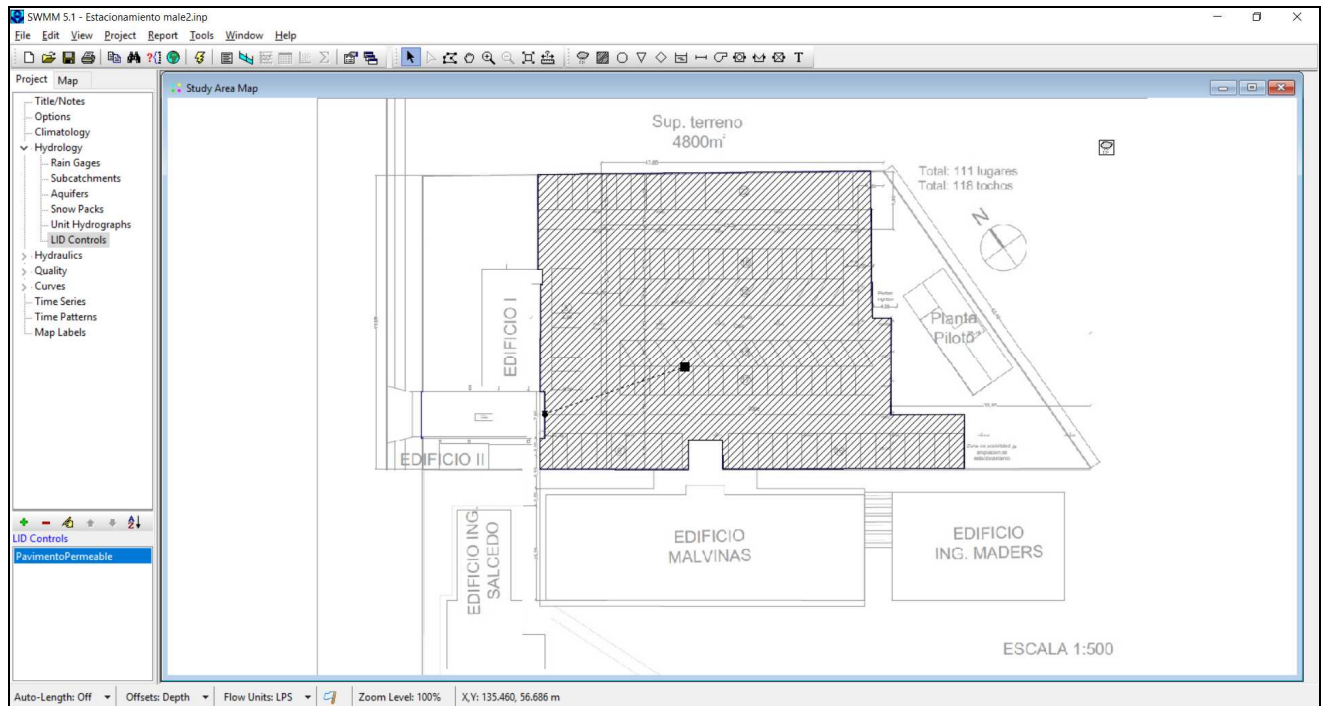


Figura VI-10. Cuenca de aporte en SWMM.

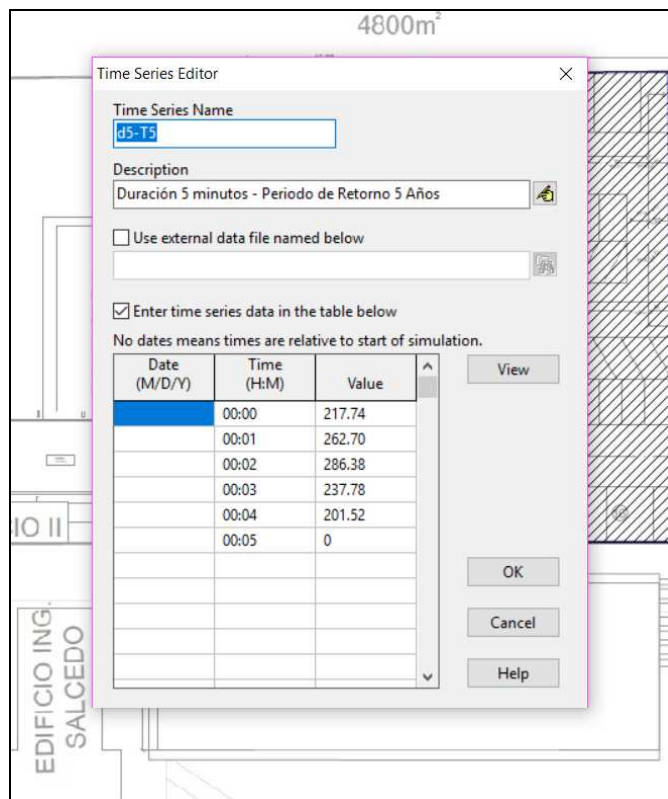


Figura VI-11. Introducción en la modelación de la lluvia de diseño.

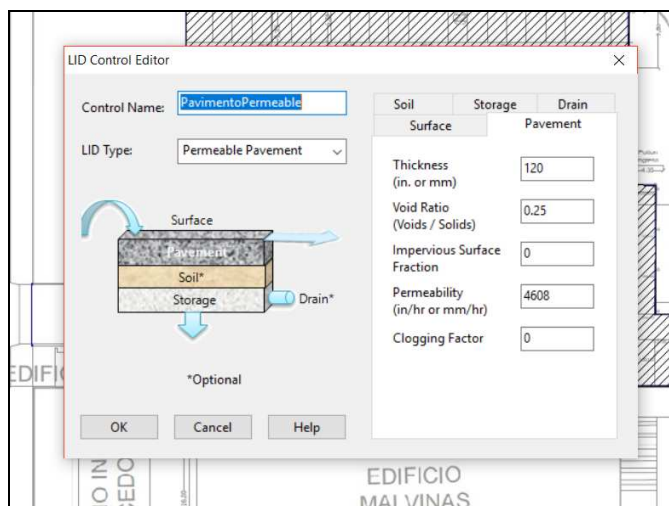


Figura VI-12. Parámetros LID para el pavimento permeable en SWMM.

Cargados todos los datos necesarios se procedió a correr la simulación, resultando ésta exitosa y con un nivel de error del 0.00% (Figura VI-13).

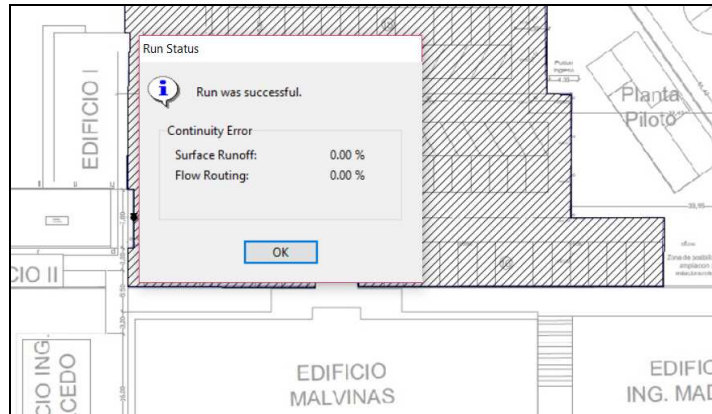


Figura VI-13. Modelación exitosa en SWMM

#### VI.5.1.1. Resultados de la modelación

El programa SWMM ofrece la posibilidad de consultar un informe de estado, en el cual se presenta un balance global de agua sobre cada estructura de SUDS contemplada, expresado por unidad de área. Este balance se realiza sobre las entradas de agua totales al sistema, sobre las salidas del sistema (la infiltración, la evaporación, la escorrentía superficial y el drenaje interno) y sobre el volumen almacenado.

En la Figura VI-14 se presentan los resultados de la modelación.

Hormigón Poroso con materiales locales, una  
contribución para la gestión de las aguas de lluvia

EPA STORM WATER MANAGEMENT MODEL - VERSION 5.1 (Build 5.1.012)

\*\*\*\*\*  
NOTE: The summary statistics displayed in this report are based on results found at every computational time step, not just on results from each reporting time step.  
\*\*\*\*\*

\*\*\*\*\*  
Analysis Options  
\*\*\*\*\*  
Flow Units ..... LPS  
Process Models:  
  Rainfall/Runoff ..... YES  
  RDII ..... NO  
  Snowmelt ..... NO  
  Groundwater ..... NO  
  Flow Routing ..... NO  
  Water Quality ..... NO  
Infiltration Method ..... HORTON  
Starting Date ..... 07/11/2017 00:00:00  
Ending Date ..... 07/11/2017 22:59:00  
Antecedent Dry Days ..... 0.0  
Report Time Step ..... 00:01:00  
Wet Time Step ..... 00:01:00  
Dry Time Step ..... 00:01:00

	Volume hectare-m	Depth mm
Runoff Quantity Continuity		
-----		
Total Precipitation .....	0.006	20.102
Evaporation Loss .....	0.000	0.000
Infiltration Loss .....	0.004	13.698
Surface Runoff .....	0.000	0.000
LID Drainage .....	0.002	6.404
Final Storage .....	0.000	0.000
Continuity Error (%) .....	0.000	

SWMM 5.1

Page 1

	Volume hectare-m	Volume 10 <sup>6</sup> ltr
Flow Routing Continuity		
-----		
Dry Weather Inflow .....	0.000	0.000
Wet Weather Inflow .....	0.002	0.019
Groundwater Inflow .....	0.000	0.000
RDII Inflow .....	0.000	0.000
External Inflow .....	0.000	0.000
External Outflow .....	0.002	0.019
Flooding Loss .....	0.000	0.000
Evaporation Loss .....	0.000	0.000
Exfiltration Loss .....	0.000	0.000
Initial Stored Volume ....	0.000	0.000
Final Stored Volume .....	0.000	0.000
Continuity Error (%) .....	0.000	

\*\*\*\*\*  
Subcatchment Runoff Summary  
\*\*\*\*\*

Subcatchment	Total Precip mm	Total Runon mm	Total Evap mm	Total Infil mm	Total Runoff mm	Total Runoff 10 <sup>6</sup> ltr	Peak Runoff LPS	Runoff Coeff
Cuenca	20.10	0.00	0.00	13.70	6.40	0.02	0.61	0.319

\*\*\*\*\*  
LID Performance Summary  
\*\*\*\*\*

Subcatchment	LID Control	Total Inflow mm	Evap Loss mm	Infil Loss mm	Surface Outflow mm	Drain Outflow mm	Initial Storage mm	Final Storage mm	Continuity Error %
Cuenca	PavimentoPermeable	20.10	0.00	13.70	0.00	6.40	0.00	0.00	-0.00

Analysis begun on: Wed Aug 30 10:34:19 2017  
Analysis ended on: Wed Aug 30 10:34:19 2017  
Total elapsed time: < 1 sec

SWMM 5.1

Page 2

Figura VI-14. Balance de agua para el evento de lluvia sobre el pavimento permeable.

Como puede observarse para la lluvia de diseño planteada, que representa una precipitación de 20,10 mm, se tiene una infiltración de 13,70 mm, una salida por escurrimiento superficial de 0,00 mm y una salida mediante el dren de 6,40 mm, sin ningun almacenamiento inicial ni final.

Como puede observarse ante un evento de lluvia de estas características, mediante el uso de este tipo de Sistema Urbanos de Drenaje Sostenible se logra evitar el encharcamiento sobre el pavimento y la consiguiente escorrentía superficial; además de reducir la cantidad de agua que se incorpora al sistema de desagüe pluvial de la ciudad. Pues se logra mediante el pavimento permeable infiltrar gran parte del agua caída.

## **VI.6. MODELACIÓN DE UN PAVIMENTO DE HORMIGÓN CONVENCIONAL**

Se optó por modelar con SWMM 5.1 la cuenca del estacionamiento, si este fuera de pavimento de hormigón convencional.

### **VI.6.1. DIMENSIONADO DE PAVIMENTO DE HORMIGÓN CONVENCIONAL**

Para el dimensionado del pavimento de hormigón convencional se utilizaron dos métodos. Primeramente se diseñó según Guide for Design and Construction of Concrete Parking Lots (ACI Committee 330, 2001), y luego según el Manual de Diseño y Construcción de Pavimentos de Hormigón del Instituto del Cemento Portland Argentina (ICPA, 2014). Este último no tiene por objeto el cálculo de espesores de losas de hormigón para estacionamientos, pero se realiza a los efectos de comparar el resultado obtenido por el primer método.

#### **VI.6.1.1. Diseño según Guide for Design and Construction of Concrete Parking Lots. (ACI Committee 330, 2001).**

El método para determinar el espesor del pavimento se basa en estudios teóricos y de laboratorio que relacionan las tensiones del hormigón y las

características de fatiga con la de naturaleza de la subrasante, así como con la magnitud y ubicación de las cargas sobre las losas.

Para determinar el espesor del pavimento, se necesita conocer el tipo de vehículos que solicitarán el pavimento, el volumen diario de cada tipo de vehículo, la carga vehicular.

Del Informe del Comité ACI 330R-01 se tiene:

- Categoría de tránsito "A1": corresponde a carriles de acceso para camiones. No se optó por la categoría A que corresponde a áreas de estacionamiento y vías de acceso para autos, camionetas y pequeños camiones porque mediante este estacionamiento se accede a distintos centros de investigación e instalaciones de la facultad, que requirieren de materiales de construcción e insumos que son trasladados en camiones de mayor porte.
- Para el tipo de suelo CL-ML (Limo arcilloso), que es el que corresponde al tipo de suelo en la zona del estacionamiento
  - Coeficiente de balasto de la subrasante:  $k=200$  psi/in o  $k=4\text{kg/cm}^3$
- Módulo de rotura a flexión del hormigón. La Ecuación VI-5 permite obtener el Módulo de rotura en función de la resistencia a compresión del hormigón. Para un hormigón H20 se tiene:

$$M_R = 0.445 \cdot (f')^{2/3} \quad \text{Ecuación VI-5}$$

$$M_R = 0.445 \cdot (20)^{2/3}$$

$$M_R = 3.28 \text{ MPa}$$

Se adopta  $M_R = 3,50$  MPa ó  $M_R = 500$  psi

Entrando a la Tabla 2.4 de la Guía (Figura VI-15) con el Módulo de rotura, el coeficiente de balasto y el tipo de tránsito se obtiene el espesor de la losa de hormigón para pavimento de estacionamiento recomendado en pulgadas para un diseño de 20 años.



**Table 2.4—Twenty-year design thickness recommendations, in. (no dowels)**

Traffic category	$k = 500$ ( $CBR = 50$ ) $M_R$				$k = 400$ ( $CBR = 38$ ) $M_R$				$k = 300$ ( $CBR = 26$ ) $M_R$			
	650	600	550	500	650	600	550	500	650	600	550	500
A (ADTT= 0)*	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	4.0
A-1 (ADTT =1)*	3.5	3.5	4.0	4.0	3.5	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.5
A-1 (ADTT = 10)	4.0	4.5	4.5	5.0	4.5	4.5	5.0	5.0	4.5	4.5	5.0	5.5
B (ADTT = 25)	4.0	4.5	4.5	5.0	4.5	4.5	5.0	5.5	4.5	4.5	5.0	5.5
B (ADTT = 300)	5.0	5.0	5.0	5.5	5.0	5.0	5.5	6.0	5.0	5.5	5.5	6.0
C (ADTT = 100)	4.5	5.0	5.5	6.0	5.0	5.0	5.5	6.0	5.0	5.5	5.5	6.0
C (ADTT = 300)	5.0	5.5	5.5	6.0	5.0	5.5	6.0	6.0	5.5	5.5	6.0	6.5
C (ADTT = 700)	5.5	5.5	6.0	6.0	5.5	5.5	6.0	6.5	5.5	6.0	6.0	6.5
D (ADTT = 700)	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5

Traffic category	$k = 200$ ( $CBR = 10$ ) $M_R$				$k = 100$ ( $CBR = 3$ ) $M_R$				$k = 50$ ( $CBR = 2$ ) $M_R$			
	650	600	550	500	650	600	550	500	650	600	550	500
A (ADTT= 0)	3.5	3.5	3.5	4.0	3.5	3.5	3.5	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0
A-1 (ADTT =1)	4.0	4.0	4.5	4.5	4.0	4.5	4.5	5.0	4.5	5.0	5.0	5.5
A-1 (ADTT = 10)	4.5	5.0	5.5	5.5	5.0	5.5	6.0	6.0	5.5	6.0	6.5	7.0
B (ADTT = 25)	4.5	5.0	5.5	6.0	5.0	5.5	6.0	6.5	5.5	6.0	6.5	7.0
B (ADTT = 300)	5.0	5.5	6.0	6.5	5.5	6.0	6.5	7.0	6.5	6.5	7.0	7.5
C (ADTT = 100)	5.5	5.5	6.0	6.5	6.0	6.0	6.5	7.0	6.5	7.0	7.5	8.0
C (ADTT = 300)	5.5	6.0	6.5	7.0	6.0	6.5	7.0	7.5	6.5	7.0	7.5	8.0
C (ADTT = 700)	6.0	6.0	6.5	7.0	6.5	6.5	7.0	7.5	7.0	7.5	8.0	8.5
D (ADTT = 700)	7.0	7.0	7.0	7.0	8.0	8.0	8.0	8.0	9.0	9.0	9.0	9.0

\*ADTT = average daily truck traffic. Trucks are defined as vehicles with at least six wheels; excludes panel trucks, pickup trucks, and other four-wheel vehicles. See Appendix A. For thickness conversion to SI units, see Appendix E.

Figura VI-15. Espesor de losa de hormigón para pavimento convencional. (ACI Committee 330, 2001)

El espesor por tabla resultó de 5.5 pulgadas, que es aproximadamente 14 cm. Por cuestiones constructivas se adopta un espesor de 15 cm.

#### VI.6.1.2. Diseño según el Manual de Diseño y Construcción de Pavimentos de Hormigón (ICPA, 2014)

La losa de un pavimento de hormigón es un elemento estructural que puede y debe ser diseñado para soportar las cargas de tránsito previstos. El método que propone el Manual del Instituto del Cemento Pórtland Argentino para que el pavimento de hormigón brinde un servicio satisfactorio y económico durante su periodo de diseño, tiene en cuenta lo siguiente:

1. Valor soporte de la subrasante
2. Eliminación del bombeo, cuando la calidad del suelo de la subrasante lo exija mediante la construcción de una sub-base
3. Distribución adecuada de las juntas
4. Resistencia estructural adecuada para las solicitaciones a que estará expuesto.

Para el diseño se necesita conocer el tipo de suelo de la subrasante, el cual por datos brindados por la Dirección de Planeamiento Físico de la Facultad Regional Córdoba es suelo tipo CL-ML. A partir de esta información y según el ábaco de la Figura 2-47 del Manual del ICPA (2014) se obtiene el valor del CBR del suelo y el valor del coeficiente de balasto de la subrasante. Así por ejemplo, para un suelo CL-ML se tiene un CBR de 8, y un K de 50 MPa/m como puede observarse en la Figura VI-16.

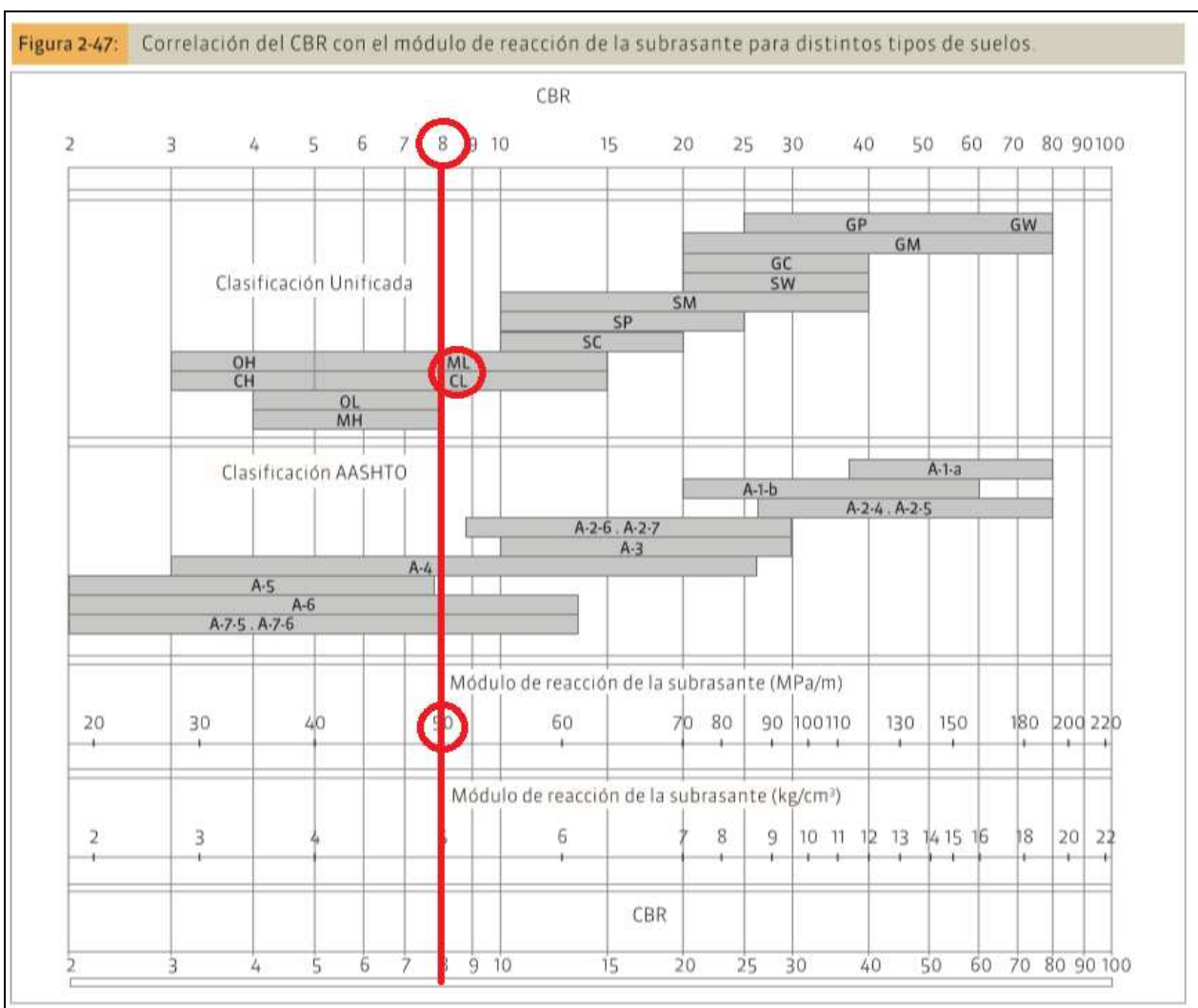


Figura VI-16. Determinación de k según el tipo de suelo. (Fuente: ICPA, 2014)

Conocido el valor de k y en función de la clasificación de la vía se determina el espesor de del pavimento de hormigón en cm. según la Figura 2-10 del Manual del ICPA (2014). Se observa en la Figura 2-17, que el espesor para el pavimento del

estacionamiento en estudio, eligiendo una calle residencial, es de 14 cm. Se adopta por cuestiones constructivas un espesor de 15 cm.

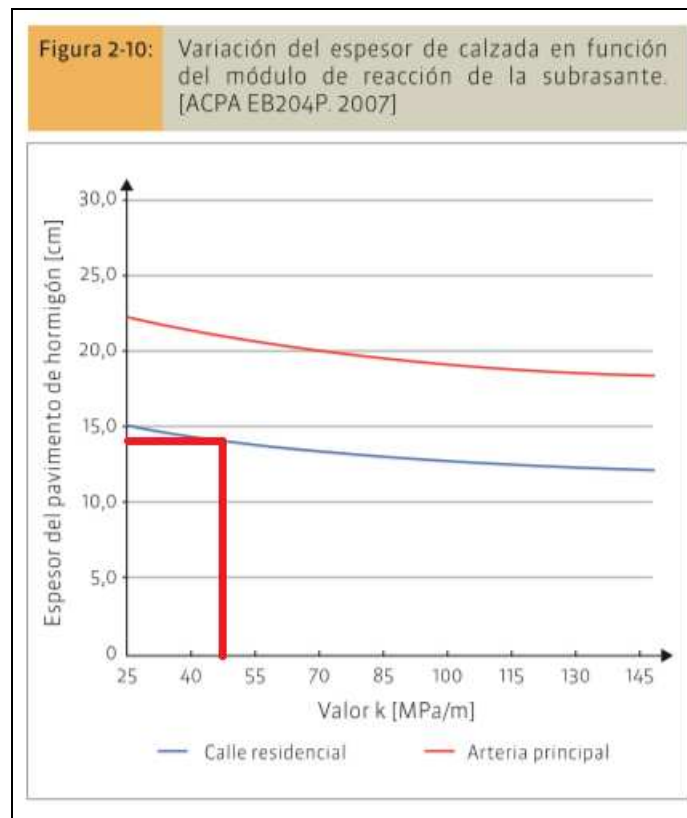


Figura VI-17. Espesor del pavimento en función de k. (Fuente: ICPA, 2014)

## VI.6.2. MODELADO DEL PAVIMENTO DE HORMIGÓN CONVENCIONAL

En función de los cálculos efectuados según los dos métodos empleados, se adoptó un paquete estructural de una subrasante de terreno natural y una capa de rodamiento de hormigón estructural H20 de 15 cm de espesor.

El paquete estructural del pavimento convencional sería como el observado en la Figura VI-18.

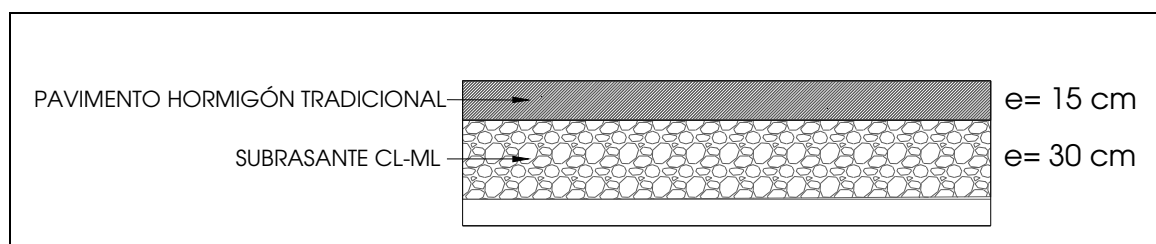


Figura VI-18. Paquete estructural del pavimento de hormigón convencional para el estacionamiento

Considerando el mismo estacionamiento para modelar, sólo que cambiando el tipo de pavimento, y por ende el sistema de drenaje, se tiene los parámetros de la Tabla VI-6 a introducir en el Programa SWMM.

Tabla VI-6. Parámetros de la cuenca y del evento hidrológico para pavimento convencional de hormigón

Parámetros de la cuenca		
Superficie [m <sup>2</sup> ]	2998	
Pendiente media [%]	0,4	
Manning	0,012*	
Modelo de infiltración	Horton	
Hormigón convencional	Espesor [mm]	150
	Tasa de percolación [mm/h]	0
	Pendiente [%]	0,4
Subrasante	Espesor [mm]	300
	Pendiente [%]	0,4

\* (Fuente: Chow, V.T. et al., 1994)

En la Figura VI-19 se parte de los datos característicos cargados de la cuenca de pavimento de hormigón convencional.

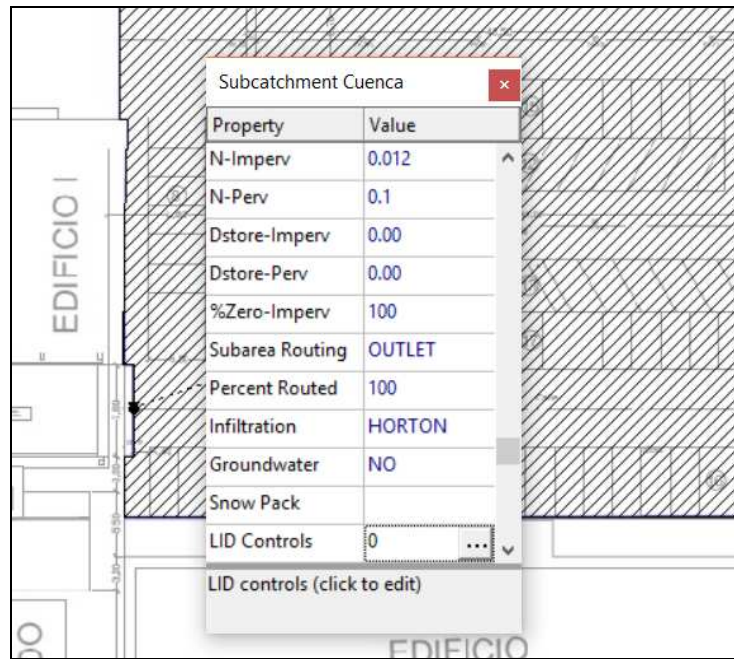


Figura VI-19. Datos de la cuenca de hormigón convencional en la modelación

De la modelación con SWMM, se obtiene el siguiente balance global de agua sobre la estructura de pavimento convencional. El balance se realiza sobre la entrada total de agua al sistema (lluvia de diseño) y las salidas del sistema (evaporación, infiltración, y escorrentía superficial).

En la Figura VI-20 se presentan los resultados de la modelación según el informe emitido por el programa.

Hormigón Poroso con materiales locales, una  
contribución para la gestión de las aguas de lluvia

EPA STORM WATER MANAGEMENT MODEL - VERSION 5.1 (Build 5.1.012)

\*\*\*\*\*  
NOTE: The summary statistics displayed in this report are based on results found at every computational time step, not just on results from each reporting time step.  
\*\*\*\*\*

\*\*\*\*\*  
Analysis Options  
\*\*\*\*\*  
Flow Units ..... LPS  
Process Models:  
Rainfall/Runoff ..... YES  
RDII ..... NO  
Snowmelt ..... NO  
Groundwater ..... NO  
Flow Routing ..... NO  
Water Quality ..... NO  
Infiltration Method ..... HORTON  
Starting Date ..... 07/11/2017 00:00:00  
Ending Date ..... 07/11/2017 22:59:00  
Antecedent Dry Days ..... 0.0  
Report Time Step ..... 00:01:00  
Wet Time Step ..... 00:01:00  
Dry Time Step ..... 00:01:00

	Volume hectare-m	Depth mm
Runoff Quantity Continuity		
-----	-----	-----
Total Precipitation	0.006	20.102
Evaporation Loss	0.000	0.000
Infiltration Loss	0.000	0.193
Surface Runoff	0.006	20.039
Final Storage	0.000	0.004
Continuity Error (%)	-0.661	

\*\*\*\*\*  
Volume Volume

SWMM 5.1

Page 1

Flow Routing Continuity	hectare-m	10 <sup>6</sup> ltr
-----	-----	-----
Dry Weather Inflow	0.000	0.000
Wet Weather Inflow	0.006	0.060
Groundwater Inflow	0.000	0.000
RDII Inflow	0.000	0.000
External Inflow	0.000	0.000
External Outflow	0.006	0.060
Flooding Loss	0.000	0.000
Evaporation Loss	0.000	0.000
Exfiltration Loss	0.000	0.000
Initial Stored Volume	0.000	0.000
Final Stored Volume	0.000	0.000
Continuity Error (%)	0.000	

\*\*\*\*\*  
Subcatchment Runoff Summary  
\*\*\*\*\*

Subcatchment	Total Precip mm	Total Runon mm	Total Evap mm	Total Infil mm	Total Runoff mm	Total Runoff 10 <sup>6</sup> ltr	Peak Runoff LPS	Runoff Coeff
Cuenca	20.10	0.00	0.00	0.19	20.04	0.06	146.74	0.997

Analysis begun on: Wed Aug 30 11:22:28 2017  
Analysis ended on: Wed Aug 30 11:22:28 2017  
Total elapsed time: < 1 sec

SWMM 5.1

Page 2

Figura VI-20. Resultados del balance de agua sobre el pavimento convencional sobre el estacionamiento

## VI.7. COMPARACIÓN DE LA RESPUESTA DE UN PAVIMENTO PERMEABLE DE HORMIGÓN POROSO Y UNO DE HORMIGÓN CONVENCIONAL.

De los resultados obtenidos de la modelación de la misma cuenca urbana, ante un mismo evento de lluvia de periodo de retorno de 5 años y duración de 5 minutos el comportamiento hidrológico, y con ello la consecuencia ambiental en ambos pavimentos es muy diferente. Diferencia que se produce justamente por las características propias de cada sistema de drenaje urbano.

Mientras el pavimento de hormigón convencional constituye un sistema impermeable de evacuación de aguas, el sistema urbano de drenaje sostenible mediante pavimento permeable disminuye la escorrentía superficial al aumentar la evacuación de aguas mediante infiltración. Puesto que los pavimentos permeables entran dentro de la categoría de sistemas de infiltración o de control en origen de la escorrentía superficial, siendo un tipo específico de superficies permeables (Pratt et al. 2002).

En la Figura VI-21 se observan los resultados del balance de aguas en la cuenca del estacionamiento cuando el mismo es de pavimento permeable de hormigón poroso y en la Figura VI-22 cuando es de hormigón convencional.

Subcatchment Runoff Summary								
Subcatchment	Total Precip mm	Total Runon mm	Total Evap mm	Total Infil mm	Total Runoff mm	Total Runoff 10 <sup>6</sup> ltr	Peak Runoff LPS	Runoff Coeff
Cuenca	20.10	0.00	0.00	13.70	6.40	0.02	0.61	0.319

LID Performance Summary								
Subcatchment	LID Control	Total Inflow mm	Evap Loss mm	Infil Loss mm	Surface Outflow mm	Drain Outflow mm	Initial Storage mm	Final Storage mm
Cuenca	PavimentoPermeable	20.10	0.00	13.70	0.00	6.40	0.00	0.00

Figura VI-21. Resultados del balance de agua en un pavimento permeable.

Subcatchment Runoff Summary								
Subcatchment	Total Precip mm	Total Runon mm	Total Evap mm	Total Infil mm	Total Runoff mm	Total Runoff 10 <sup>6</sup> ltr	Peak Runoff LPS	Runoff Coeff
Cuenca	20.10	0.00	0.00	0.19	20.04	0.06	146.74	0.997

Figura VI-22. Resultados del balance de agua en un pavimento de hormigón convencional.

A continuación en la Figura VI-23 y Figura VI-24 se presenta el balance de agua en términos del escurrimiento y la infiltración, y el escurrimiento y la precipitación para el Pavimento Permeable respectivamente. En la Figura VI-25 y Figura VI-26 se presentan dichos balances para el pavimento de hormigón convencional.

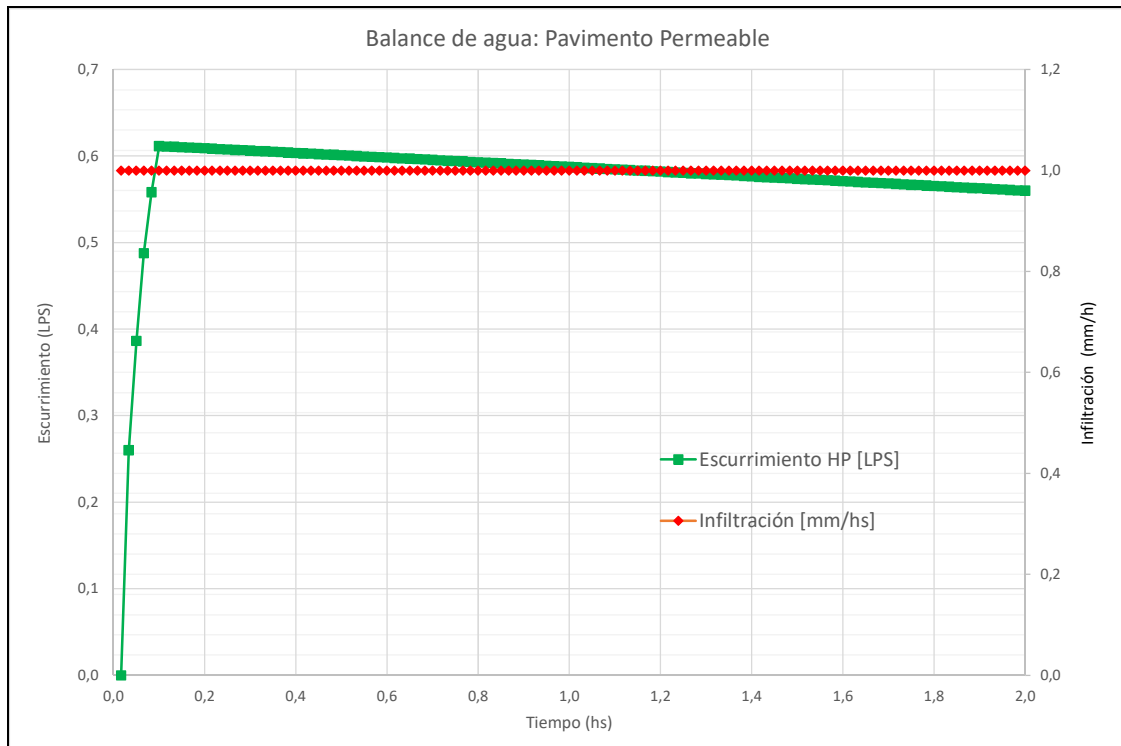


Figura VI-23. Valores de escurrimiento e infiltración en el pavimento permeable



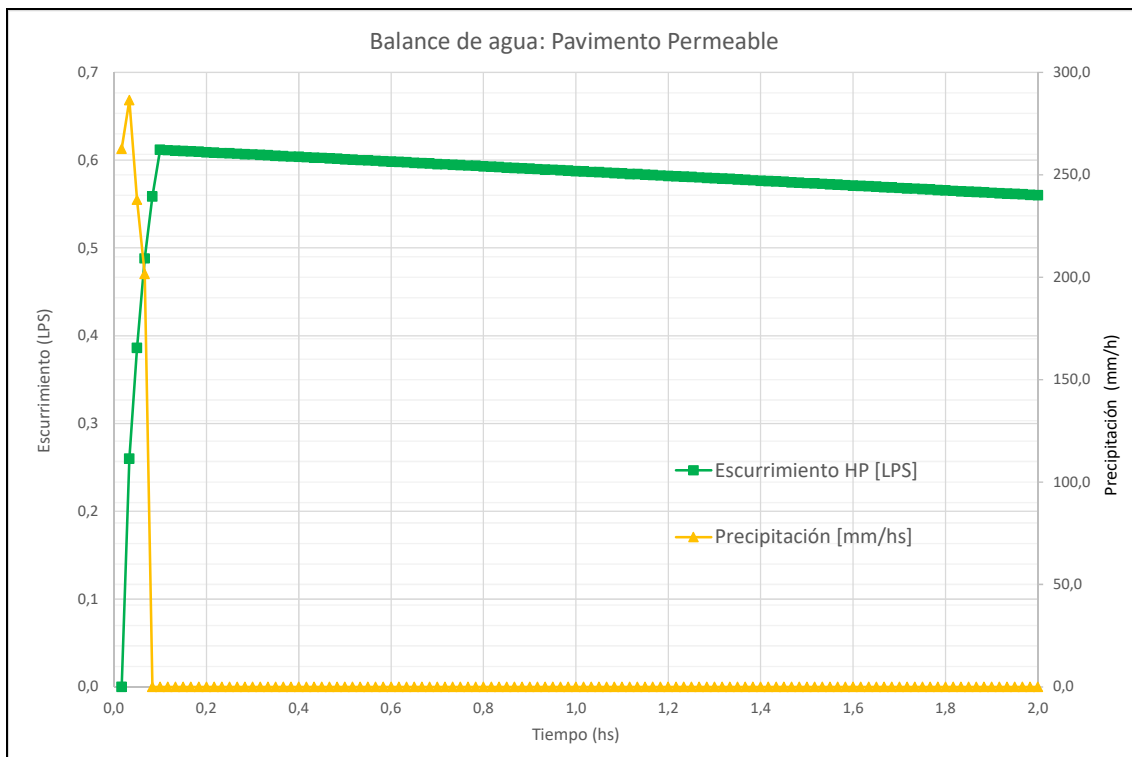


Figura VI-24. Valores de escurrimiento y precipitación en el pavimento permeable

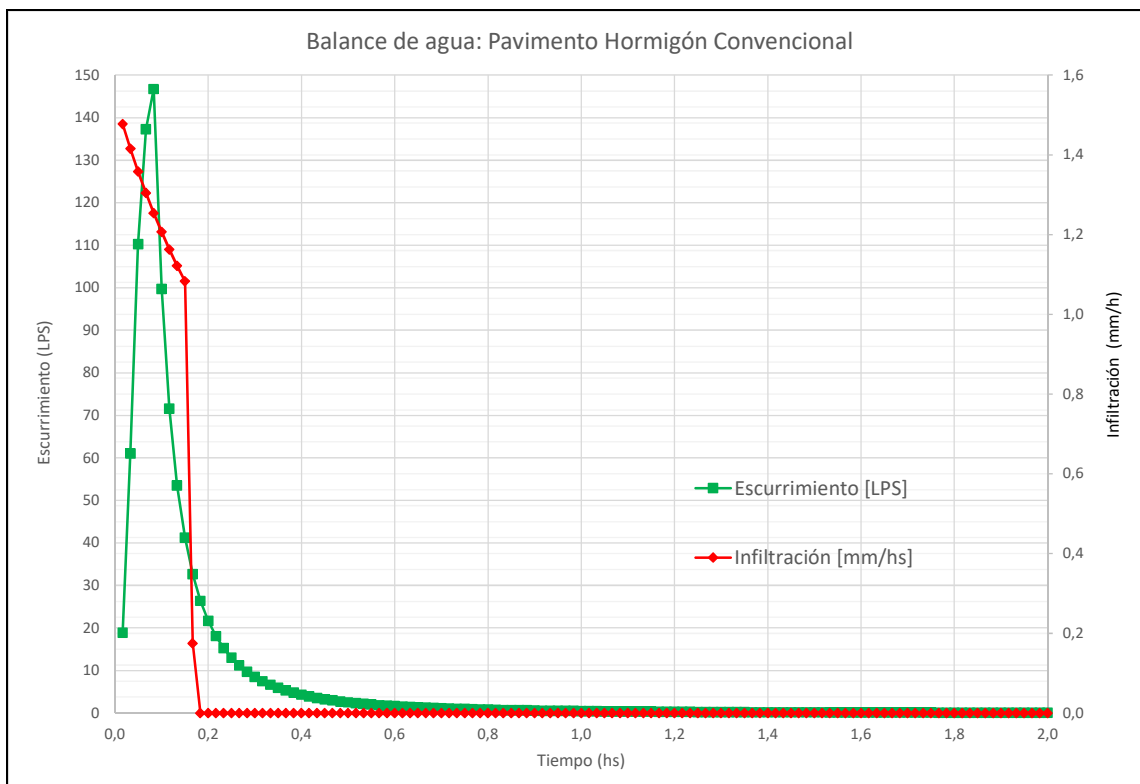


Figura VI-25. Valores de escurrimiento e infiltración en el pavimento convencional

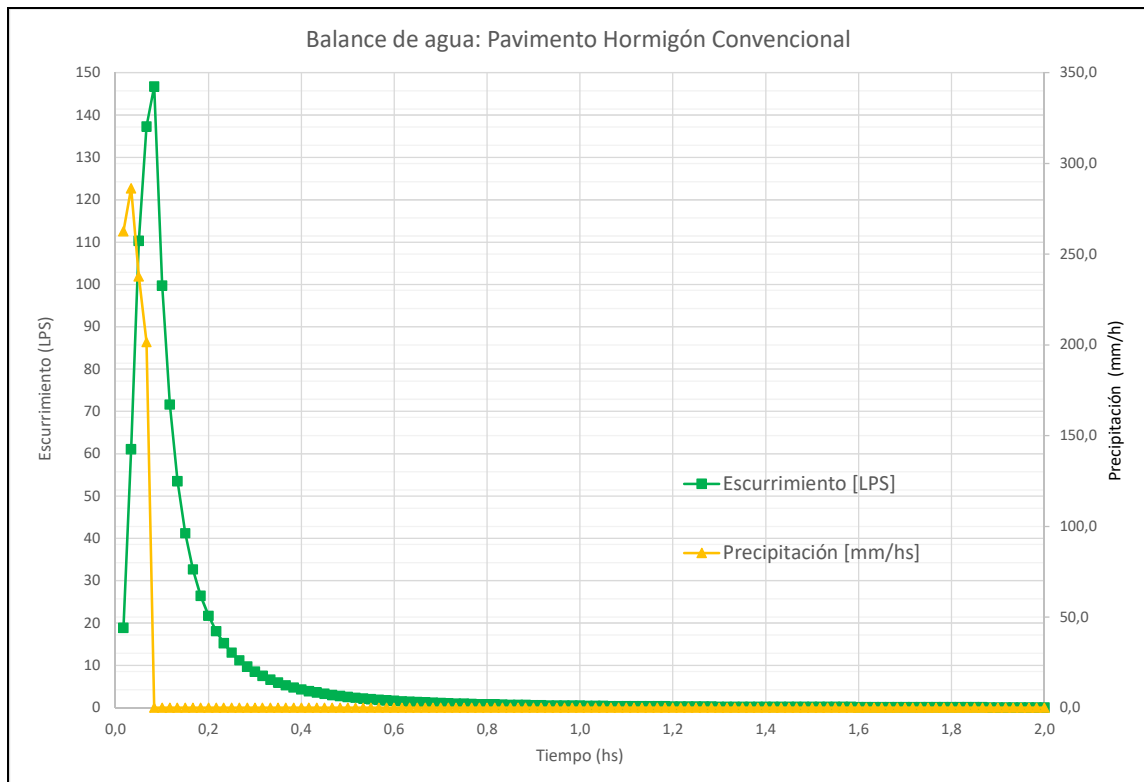


Figura VI-26. Valores de escurrimiento y precipitación en el pavimento convencional

Finalmente en la Figura VI-27 se presenta el escurrimiento de agua en el pavimento permeable y en el pavimento de hormigón convencional ante el mismo evento de precipitación.

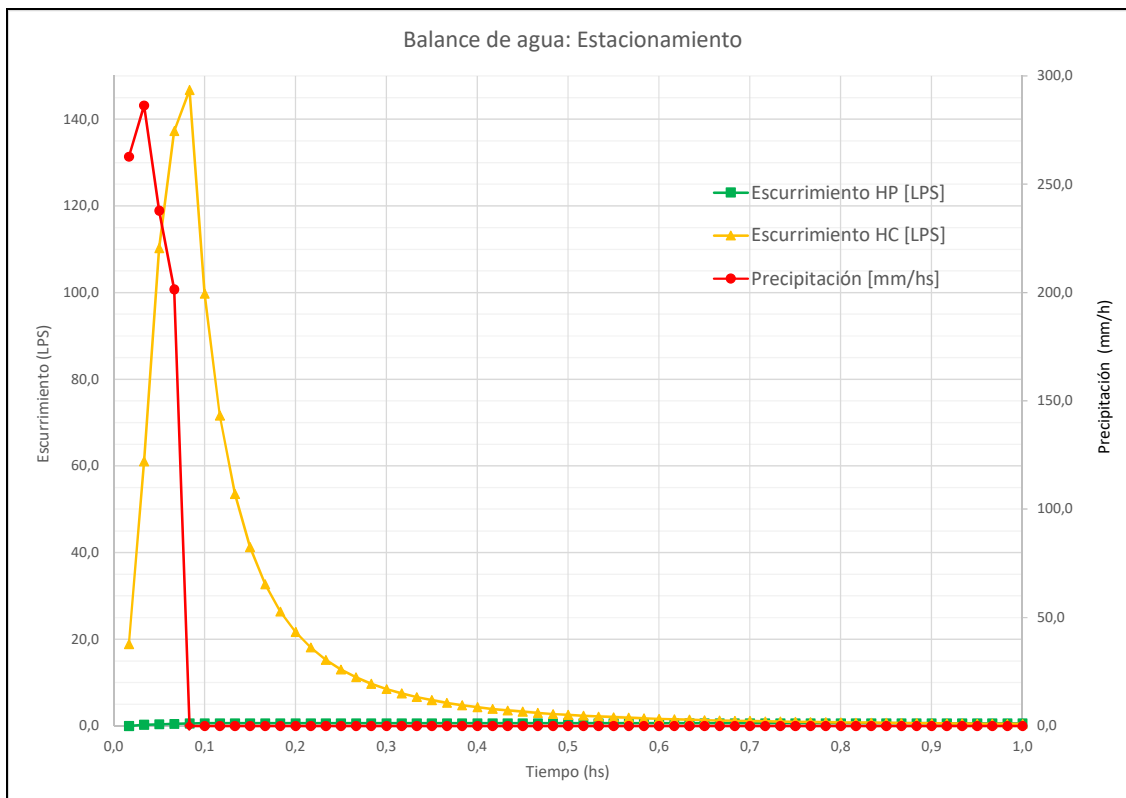


Figura VI-27. Escurrimiento en el estacionamiento para el pavimento permeable y el pavimento de hormigón convencional

## VI.8. ANÁLISIS DE RESULTADOS

De la observación de las Figuras VI-21 a VI-27, se tiene para un mismo evento de lluvia en la cuenca del estacionamiento lo siguiente:

- Para el pavimento permeable, la precipitación caída se transforma en un 0,00% de escurrimiento superficial, un 0,00% de pérdida por evaporación, 68,16% de pérdida por infiltración y 31,84% de salida por dren con un error en la modelación de 0,00%
- Para el pavimento de hormigón convencional, la precipitación se transforma en 0,94% de infiltración y 99,06% de escurrimiento superficial con un error en la modelación de 0,66%
- Sólo en el análisis del parámetro escurrimiento superficial, se logra con el pavimento permeable eliminar casi completamente el escurrimiento superficial que se genera con un pavimento de hormigón convencional

y con ello se logra una mejora en la gestión de lluvias en áreas urbanas.

- En la Figura VI-26 se observa como el pico de la lluvia se desfasa en 3,6 minutos aproximadamente del inicio de la lluvia y se convierte en escorrentía superficial en el pavimento de hormigón convencional; mientras que en el pavimento permeable el escurrimiento superficial es prácticamente nulo, hay una gran infiltración y una salida por dren luego de 6 minutos aproximadamente de iniciada la lluvia.
- No obstante, el diseño de un pavimento permeable debe apoyarse en estudios previos, como estudios hidrológicos, hidráulicos y geotécnicos, que permitan definir correctamente las condiciones de contorno del problema al que se enfrenta el proyectista. Además, el diseño debe buscar un equilibrio entre criterios de diseño y criterios económicos, de manera que se conforme finalmente la mejor solución técnicamente viable.
- Asimismo, el proceso de modelización implica adoptar una serie de parámetros y simplificar muchos aspectos de la realidad. Esta simplificación, implica que los parámetros adoptados no son totalmente representativos de los fenómenos concretos. Los parámetros de un modelo, en general se encuentran tabulados en manuales, por lo que, una manera confiable de verificar la exactitud de esos parámetros sería la calibración o la constatación de los resultados obtenidos tras la simulación con datos reales. Estos se consiguen mediante la instrumentación adecuada que permita aforar aquellos parámetros influyentes en la respuesta de la infraestructura frente a una determinada sollicitación.

## **CAPÍTULO VII. – CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**



## VII.1. HORMIGÓN POROSO

A partir de un exhaustivo estudio y trabajo experimental se seleccionó y caracterizó los agregados locales de peso normal, el cemento, los aditivos y adiciones que se utilizaron para las distintas mezclas. Se logró obtener una dosificación de un hormigón poroso que cumpla con requerimientos de trabajabilidad en estado fresco, buenas prestaciones mecánicas en estado endurecido y buen desempeño como parte de un sistema de drenaje urbano sostenible.

Se cumplió el objetivo de la investigación de encontrar una dosificación adecuada para la elaboración de hormigón poroso con materiales locales de propiedades físico-mecánicas, de resistencia apropiada y en especial con permeabilidad suficiente, para su empleo como pavimento permeable en zonas de bajo volumen de tránsito que permita un adecuado escurrimiento pluvial para una mejor gestión de las aguas de lluvia.

A partir de las últimas dosificaciones planteadas se lograron niveles más altos de resistencia a compresión, sin perjudicar la porosidad del hormigón y por ende la permeabilidad del mismo, como así también optimizar el uso de los materiales componentes del hormigón. Para esta serie de mezclas y con el fin de optimizar el uso de los materiales se disminuyó la cantidad de cemento y se agregó ceniza volante en reemplazo de parte del cemento, como una contribución ambiental al requerir menor energía de producción y eliminar menor cantidad de CO<sub>2</sub> que el cemento Pórtland en su elaboración.

Por otro lado se varió la relación a/c y la relación pasta/agregado en función de los tamaños máximos utilizados. Con la finalidad de mejorar la trabajabilidad de la mezcla, se agregó arena fina Paraná en reemplazo parcial del agregado grueso en una cantidad igual al 14% del total en la mezcla de hormigón. Se puede optar por otra arena fina local de igual módulo de finura que la Paraná. En estado fresco, el uso de agregado fino, dentro de los límites recomendados mejoró la consistencia y trabajabilidad de las mezclas. Sin embargo, el uso de finos se limitó para no crear un efecto negativo en la permeabilidad.

El valor de resistencia a compresión se ubicó dentro de los valores aceptables para hormigones estructurales y la resistencia a tracción por flexión arrojó valores

iguales o superiores a los recomendados por la bibliografía consultada para hormigones porosos.

## **VII.2. PAVIMENTO PERMEABLE DE HORMIGÓN POROSO**

La gestión de las aguas de lluvia ha sido un problema conocido a lo largo del tiempo, sobre todo cuando se producen grandes precipitaciones que superan la capacidad de los sistemas de drenajes existentes, produciendo inundaciones, contaminación difusa, como así también pérdidas personales, naturales y económicas derivadas de dichos problemas.

Los sistemas de drenaje convencionales han quedado obsoletos e infradimensionados debido al rápido crecimiento de las ciudades y el aumento de áreas impermeables.

Ante estos problemas, los ciudadanos se sienten inseguros sobre todo en épocas de precipitaciones importantes y ante el aumento de la intensidad de las precipitaciones en algunas zonas.

Con el fin de mitigar estos problemas, la gestión y tratamiento de las aguas de lluvia, enfocadas no sólo en el control de crecidas sino atendiendo aspectos ambientales, económicos y sociales se presentan como la opción más eficiente. Esta nueva concepción de drenaje urbano se apoya en el desarrollo sostenible.

Mediante esta tesis se logró comparar la capacidad de infiltración de un pavimento permeable de hormigón poroso en relación a un pavimento de hormigón convencional. De dicha evaluación y comparación ante el mismo evento de lluvia sobre la misma cuenca se desprende que:

- En el pavimento de hormigón convencional el pico de la lluvia se desfasa unos pocos minutos desde el comienzo de la lluvia y se convierte casi en su totalidad en escorrentía superficial; mientras que en el pavimento permeable, es decir en el SUDS propuesto, la lluvia tiene una salida más controlada y se atenúa el pico con un escurrimiento superficial prácticamente nulo, una gran infiltración y una salida por dren controlada y desfasada del comienzo de la lluvia. Se



comprobó una reducción de la escorrentía superficial en estacionamiento en estudio mediante el empleo del sistema de pavimento permeable de hormigón poroso. Dicha reducción fue del 99% en relación al pavimento de hormigón convencional.

- Del análisis del funcionamiento hidráulico realizado sobre el pavimento permeable se pone de manifiesto que este tipo de estructuras proporcionan resultados favorables para la gestión de la escorrentía en el origen del sistema. Además, tal y como lo demuestran los resultados obtenidos vistos en el Capítulo VI, aún en situaciones desfavorables como la existencia de terrenos prácticamente impermeables, como en el caso del tipo de suelo en la zona de estudio, es técnicamente viable y sencillo obtener el control de los volúmenes de escorrentía generados.

Se concluye que mediante el sistema de pavimento permeable de hormigón poroso como sistema SUDS elegido para gestionar las aguas de lluvias se logra adelantarse a la aparición de los problemas de inundación y con ello a lo que esta implica. Estimar la posible reducción de escorrentía pluvial en un área urbana en función de la capacidad de infiltración del hormigón poroso y la incidencia de la infiltración de las aguas de lluvia en la gestión de las inundaciones urbanas.

Se consigue controlar el volumen de escorrentía superficial en área urbana, mediante la infiltración controlada con el uso de hormigón poroso en función de la capacidad de infiltración de este obtenida en laboratorio.

Se logra captar y transportar el excedente de agua a través de dren hacia puntos de desagüe y descarga conocido.

Por otra parte, el sistema propuesto cumple con los criterios de diseño de este tipo de SUDS. El pavimento permeable es capaz de gestionar un determinado evento de precipitación, al mismo tiempo satisface la función estructural con la cual fue proyectado el pavimento para bajas cargas de tránsito.

Finalmente, se logró transferir los resultados obtenidos en la investigación a las cátedras de Tecnología del Hormigón y Tecnología de los Materiales de la carrera de Ingeniería civil y en Congresos. Se trabajó en el Centro de Investigación en la Formación de becarios alumnos en investigación.

### **VII.2.1. VENTAJAS**

El empleo de pavimentos permeables ofrece un gran número de ventajas, muchas de las cuales ya han sido citadas en los primeros capítulos.

Por su parte, Castro et al. (2005) presentan las ventajas que ofrecen las superficies permeables frente a las impermeables:

- Disminuyen las puntas de caudal en los sistemas de drenaje y en los cauces receptores.
- Pueden llegar a mejorar la calidad del agua en gran medida por filtración, absorción y biodegradación, fundamentalmente.
- Ofrecen un amplio abanico de acabados superficiales para su inserción en el diseño urbano.
- Su puesta en obra es sencilla.
- Pueden recoger y hacerse cargo de la escorrentía procedente de superficies impermeables adyacentes.
- Son una solución muy flexible que permite ajustar el costo al uso y al tiempo de vida requeridos.
- En general, constituyen una solución más barata que la combinación de superficies impermeables y sistemas de drenaje convencionales.

Los pavimentos permeables ofrecen también ventajas sociales, completando el triángulo de economía, medio ambiente y sociedad del desarrollo sostenible. Estas ventajas de servicio de los pavimentos permeables son, aparte de las mejoras estéticas, el aumento de la seguridad y de la comodidad de los ciudadanos en tiempos de lluvia, reduciendo el riesgo de accidentes de tránsito. (McBride & Knapton, 2006).

### **VII.2.2. INCONVENIENTES**

A pesar de todas sus ventajas, los pavimentos permeables también presentan problemas que deben ser tenidos en cuenta. Los principales inconvenientes comunes a todos los pavimentos permeables son:

- Colmatación.
- Degradación.
- Desconocimiento y desconfianza.

Debido a los dos primeros inconvenientes existen una serie de limitaciones en el uso de los pavimentos permeables. El riesgo de colmatación está determinado por el aporte total de sedimentos a la superficie. Este aporte es función de múltiples variables como la proximidad de materiales sueltos, la acción del viento o el régimen de precipitaciones.

Los principales inconvenientes de los pavimentos permeables, al igual que del resto de los SUDS, son el desconocimiento y la desconfianza debida a las experiencias fallidas. Un análisis realizado por Schlüter y Jefferies (2001) pone de manifiesto que los problemas que presentan los pavimentos permeables son fundamentalmente debidos a un inadecuado diseño y ejecución. Ferguson (2006) señala que el buen funcionamiento de un pavimento permeable depende de una correcta selección, diseño, ejecución y mantenimiento de los elementos que lo componen, y los fallos de capacidad portante o de bloqueo resultan de negligencias en alguno de estos pasos. Por su parte, Steffen y Meinheit (2006) señalan que los errores y la falta de calidad en ejecuciones de pavimentos permeables se deben fundamentalmente a las faltas de formación y de control, unidas a la presión de los plazos de ejecución. Por ejemplo, es fundamental saber que las características de los materiales de construcción empleados en los pavimentos permeables son distintas a las de los empleados en los pavimentos impermeables dado que deben permitir el paso del agua, asegurando la durabilidad del pavimento (Shackel, 2006).

En cualquier caso, se debe hacer frente a estos inconvenientes mediante trabajos de investigación y publicaciones que permitan generalizar la construcción eficiente de los pavimentos permeables. Ferguson (2006) afirma que la investigación científica y la experiencia práctica sobre pavimentos permeables han disipado los rumores y especulaciones que hace tiempo limitaron su adecuada aplicación.

## **VII.3. RECOMENDACIONES**

### **VII.3.1. MEDIDAS PREVENTIVAS: LEGISLACIÓN, FORMACIÓN E INVERSIÓN**

Como se mencionó anteriormente la utilización de pavimento de hormigón poroso es sólo una de las técnicas utilizadas dentro del concepto de los SUDS. Por lo tanto deben analizarse el resto de medidas estructurales y no estructurales a llevar a cabo para completar la totalidad de la gestión de las aguas de lluvia dentro de un marco sostenible.

Las medidas preventivas son consideradas como técnicas no estructurales, mediante las cuales se pretende evitar los problemas asociados a la escorrentía superficial. Dentro de las medidas preventivas pueden distinguirse técnicas como legislación, formación e inversión.

#### **VII.3.1.1. LEGISLACIÓN**

Desde el punto de vista legal, existen diferentes formas de intervención municipal y/o provincial en el medio ambiente urbano que pueden fomentar la aplicación de los SUDS:

- Incorporación a leyes y ordenanzas de gestión de aguas pluviales a través de sistemas urbanos de drenaje sostenible.
- Acceso libre a la información de las administraciones públicas y difusión de la misma entre los ciudadanos.
- Protección del medio ambiente urbano y correcto diseño del drenaje desde las áreas de planeamiento municipal y/o provincial.
- Multas y penalizaciones asociadas al incumplimiento de lo anterior o utilización de sistemas de beneficios para quienes apliquen correctamente los SUDS.
- Evaluar desde los municipios la posibilidad de generar retribuciones impositivas a los ciudadanos que realicen tratamientos en origen de las aguas pluviales generadas en sus domicilios.

En la actualidad es necesario adaptar el marco legal municipal y/o provincial para fomentar una correcta gestión de las aguas pluviales, presentando el uso de SUDS como una opción viable y ecológica. Sin embargo, para lograr una legislación adecuada es necesario recurrir a grupos de trabajo con profesionales idóneos que puedan generar documentos de aplicación de SUDS factibles de incorporar por cualquier tipo de municipio con suficiente éxito.

### VII.3.1.2. FORMACIÓN

De la formación de la sociedad en general dependen las soluciones futuras de la mayoría de los problemas actuales incluido el drenaje urbano.

Es de vital importancia para evitar contaminación difusa la concientización de la ciudadanos sobre el problema que genera la evacuación de residuos en áreas públicas o inadecuadas para tal fin y de la necesidad del correcto funcionamiento de sistemas que eviten derrames de sustancias peligrosas o contaminantes al sistema de drenaje urbano.

A nivel municipal y provincial deberían generarse mesas de trabajo con profesionales idóneos en el tema de SUDS para relevar los problemas actuales y posibles soluciones a través de la aplicación de estos sistemas. La interacción con las Universidades es de suma importancia ya que permite realizar investigaciones y transferir conocimientos acerca de estos temas desde sus carreras de grado y/o Maestrías y Doctorados.

La formación de directivos de áreas públicas, profesionales y todas aquellas personas relacionadas a las áreas de planeamiento y aplicación de estas medidas no es menos importante, ya que de ellos dependerá el éxito de la correcta implementación de los SUDS.

### VII.3.1.3. INVERSIÓN

Las medidas preventivas no tendrán éxito sin una adecuada inversión económica que asegure que se lleva a cabo en las mejores condiciones posibles. Las administraciones provinciales, y en especial las municipales, deben contar con

una partida del presupuesto anual que permita elaborar y hacer cumplir adecuadamente las normativas que aseguren la generalización de la aplicación del drenaje urbano sostenible.

Además, sin un adecuado nivel de inversión económica por parte de las administraciones públicas, no es posible afrontar la elaboración de manuales de diseño y construcción, recomendaciones o programas de seguimiento que aseguren la correcta aplicación, ejecución y mantenimiento de los SUDS. Destacar como primordial el último aspecto, pues en todos los casos es necesario dedicar una parte importante del presupuesto al mantenimiento de los sistemas construidos, pues no sirve de nada poner en marcha una solución si no se asegura su continuidad a lo largo del tiempo (Sañudo Fontaneda, et al., 2012).

### **VII.3.2. RECOMENDACIONES DE DISEÑO**

Para que un pavimento permeable sea funcional debe cumplir con una adecuada capacidad de infiltración y depuración. Una adecuada capacidad de infiltración se logra a partir de dos premisas fundamentales:

- Infiltrar un volumen de agua afluente: esto se logra gracias a la capa de hormigón poroso que permite la entrada de agua a la estructura del pavimento.
- Gestionar un volumen de agua efluente: se logra con las capas inferiores del pavimento de adecuadas características de permeabilidad y volumen de huecos.

El volumen de agua afluente que recibe el pavimento permeable está compuesto por la suma de la precipitación caída sobre el pavimento, más la escorrentía superficial proveniente de áreas impermeables o de otras cuencas. Por lo tanto es de suma importancia contar con datos de precipitaciones máximas y curvas de intensidad-duración-frecuencia de la zona de emplazamiento, en lo que respecta a datos hidrológicos. Por otra parte se debe realizar un minucioso estudio hidrológico para identificar cuencas de aporte y escorrentía de áreas impermeables que tengan como punto de evacuación el pavimento permeable que se está diseñando.

El criterio de elección de la lluvia de diseño es flexible, normalmente, es suficiente con considerar un periodo de retorno entre dos y diez años, con una duración de la precipitación igual al correspondiente tiempo de concentración de la cuenca impermeable vertiente, o en su defecto cinco minutos.

En la práctica el pavimento permeable cuenta con una capacidad de infiltración muy superior a la necesaria. Sin embargo, existe un riesgo de colmatación a lo largo de la vida útil del mismo lo que hace que esta capacidad vaya disminuyendo. Debido a esto, es necesario recabar y analizar información acerca del clima, posibilidad de erosión eólica en zonas cercanas y otros factores que puedan aumentar la tasa natural de aporte de sedimentos al pavimento permeable. Con los datos recabados se debe realizar una valoración del riesgo de colmatación del pavimento en forma de coeficiente de seguridad, siendo como mínimo de 10 y pudiendo utilizarse valores mayores como 100 ó 1000 en función de la disminución de la esperanza de mantenimiento.

Respecto a la gestión del efluente, se debe conocer la geotecnia e hidrogeología del área de emplazamiento del pavimento permeable. Se debe conocer los tipos de suelos presentes, espesores y permeabilidades, como así también la profundidad del nivel freático. Del análisis de estos datos surgirá la posibilidad o no de infiltrar el agua efluente directamente en el terreno. De no ser posible la infiltración total del volumen efluente se podrá considerar la opción de colocación de drenes filtrantes que se conecten al sistema de drenaje pluvial existente, evaluando previamente la capacidad de los mismos y la posibilidad de soportar estos caudales diferidos provenientes del pavimento permeable.

Por último, deben diseñarse las capas inferiores del pavimento permeable asegurando una permeabilidad creciente con la profundidad desde la capa de pavimento permeable, debiendo tener los geotextiles de filtro y separación una permeabilidad adecuada en caso de infiltración del volumen efluente en terreno. Respecto a la sub-base, su espesor será el necesario para albergar la diferencia entre el volumen de agua que ingresa y el que sale del sistema durante un determinado período de tiempo. Este espesor será mayor o menor dependiendo de la porosidad del material, oscilando entre 30 y 40% para capas granulares. En el caso de opción sin infiltración en terreno, el volumen de la sub-base debe estar correctamente impermeabilizado.

El proyecto de un pavimento permeable no está completo sin la correspondiente comprobación estructural del mismo. Para ello, es necesario determinar el tipo y la intensidad del tránsito en la zona de emplazamiento del pavimento permeable, previendo modificaciones futuras que podrían ocurrir. Para soportar estas solicitudes, las resistencias de los materiales de construcción y los espesores de las distintas capas del pavimento permeable deben ser adecuados. Así, el primer paso es comprobar la calidad de la superficie, parámetro fundamental para asegurar la correcta capacidad portante del conjunto del pavimento. En todos los casos, la superficie debe ofrecer un soporte mínimo con un CBR mayor de 5, debiendo aumentar esta exigencia al aumentar el tránsito considerado (Rodríguez Hernández, 2008). Respecto a la capa sub-base esta debe transmitir correctamente las cargas de la superficie, esto se logra generalmente utilizando áridos de granulometría lo más continua posible.

### **VII.3.3. RECOMENDACIONES DE CONSTRUCCIÓN**

La inspección y supervisión de los esquemas estructurales y de construcción del pavimento permeable de hormigón poroso por parte del proyectista y el jefe de obra, son vitales para comprobar que se están construyendo de forma correcta. Dichas inspecciones deben incluir al menos los siguientes apartados básicos:

- Inspección previa a cualquier excavación para garantizar que la escorrentía que pueda originarse sea tratada adecuadamente y no cause ninguna obstrucción en el pavimento permeable.
- Inspección durante la colocación de cualquier tubería permeable o no o realización de dren filtrante para prevenir posibles flujos imprevistos de agua.
- Inspección del planteamiento completo del pavimento permeable e inspección pormenorizada de cada una de las etapas de construcción del mismo.
- Inspección final antes de entregar la obra al cliente.



Los pasos fundamentales a seguir en la construcción de pavimentos permeables son los siguientes:

- Comprobar que la superficie de emplazamiento del pavimento permeable sea la adecuada. De existir partes de terreno blando debe ser excavado y posteriormente rellenado con material adecuado y correctamente compactado. Si se emplea una mejora de la superficie, se hará necesario comprobar que se consigue obtener el índice CBR calculado en proyecto.
- Controlar el correcto uso de cualquier membrana impermeable: especificación, instalación y tratamiento, con precaución para garantizar que no sea dañada durante el proceso de construcción. Para contrastar las características presentadas por el fabricante, se recomienda pedir asesoramiento a un laboratorio especializado.
- Utilizar adecuadamente los geotextiles de filtro y separación, de acuerdo a las instrucciones del fabricante, sin ningún tipo de pliegues y con un solape mínimo de 300 mm.
- La sub-base debe compactarse en capas de entre 100 y 150 mm de espesor, con el fin de garantizar que se obtiene la máxima densidad para el tipo y graduación del material, sin trituración de las partículas individuales y reduciendo la diferencia con los valores de diseño, dentro de una tolerancia de +20 mm a -15 mm del nivel de diseño (Sañudo Fontaneda, et al., 2012).
- Evitar la segregación de los áridos empleados. En el caso de pavimentos permeables de hormigón poroso con falta de finos, puede producirse la segregación del árido en el proceso de transporte y en el de construcción. Así, es conveniente el uso de áridos angulosos y materiales triturados con alta superficie de fricción.
- Cuidar la ejecución de la capa de hormigón poroso, controlando la mezcla, transporte y colocación del mismo, basándose en las recomendaciones ya mencionadas en el capítulo V.

- Medir la capacidad de infiltración de la superficie recién realizada mediante ensayos para comprobar el estado inicial del pavimento permeable.

#### **VII.3.4. RECOMENDACIONES DE MANTENIMIENTO**

El mantenimiento es determinante para el correcto funcionamiento del pavimento permeable y todo el sistema de drenaje urbano sostenible. Por lo tanto, en pavimentos permeables es de gran importancia el correcto plan de mantenimiento así como su adecuada realización.

Sin mantenimiento, los pavimentos permeables pueden estar colmatados en tres años (Legret, 2001; Scholz & Grabowiecki, 2007) o pueden mantener su capacidad de infiltración más de 6 años (Raimbault et al., 1985; Brattebo & Booth, 2003). Todo depende del aporte de sedimentos que tenga el emplazamiento. Mientras, con un correcto mantenimiento, la vida útil de un pavimento permeable puede alcanzar los veinte años, tanto para superficies continuas (Caltrans, 2007), como discontinuas (Shackel, 2006). No obstante, el costo del mantenimiento puede llegar a ser elevado y la frecuencia necesaria de limpieza puede ser alta, dependiendo de las condiciones específicas de cada localización, por lo que en muchas aplicaciones se acepta la pérdida de permeabilidad y no se realiza mantenimiento alguno (McCormack, 2006).

Todos los pavimentos permeables deben ser inspeccionados varias veces durante los primeros meses después de su construcción y posteriormente, como mínimo una vez al año. Las inspecciones deben realizarse después de grandes lluvias para comprobar el correcto funcionamiento de la superficie (Caltrans, 2007). Los diagnósticos en estas inspecciones deben realizarse en función de la realización de ensayos de infiltración en campo.

Experiencias previas han mostrado la gran dificultad existente en recuperar capas permeables muy colmatadas, siendo mucho más efectiva la limpieza periódica preventiva a la hora de mantener la funcionalidad del pavimento (Goacolou, 1993).

Las medidas preventivas que pueden minimizar los aportes de sedimentos son básicamente dos:

- Evitar el drenaje de zonas verdes hacia el pavimento permeable, minimizando así el principal aporte natural de sedimentos.
- Los pavimentos permeables deberían ser cubiertos cuando existan obras cercanas, minimizando así el principal aporte artificial de sedimentos.

Para asegurar el correcto funcionamiento del pavimento permeable se debe mantener la superficie limpia y libre de sedimentos mediante un barrido con aspiración al menos dos veces al año, dependiendo de los aportes recibidos (variables según la erosión de los materiales del entorno, de la dirección del viento predominante y de los aportes de escorrentía superficial) (Sañudo Fontaneda, et al., 2012). Respecto a los mecanismos de limpieza, el más efectivo, empleado con mezclas porosas, consiste en la proyección de agua a presión y el aspirado inmediato de la suciedad movilizada por el agua, resultando una superficie limpia y seca. Este sistema, con pasadas cada seis meses, comenzando un año después de la puesta en obra de la mezcla porosa, es capaz de recuperar del 80% al 90% de la permeabilidad inicial (Membrillo Medrano, 1995) (Rodríguez Hernández, 2008).

La participación del usuario también es muy importante, por lo que debe estar informado y ser consciente del tipo de pavimento que pisa, como funciona y que acciones lo perjudican. La frecuencia de renovación de la capa superficial dependerá de la limpieza y el uso diario que se dispense a estos pavimentos permeables.

#### **VII.4. FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACIÓN**

Las futuras investigaciones pueden dividirse en dos líneas; una que implique profundizar el estudio del hormigón poroso como material componente del pavimento permeable y otra referente al diseño y construcción del pavimento permeable de hormigón poroso. No obstante, debería considerarse la posibilidad de futuras investigaciones sobre Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible en general, su aplicación en el medio local y la comparación entre ellos sobre todo en cuanto a impacto ambiental se refiere.

Particularmente, del desarrollo de esta tesis, y en función de lo mencionado anteriormente, se citan algunas de las líneas de futuras investigaciones más interesantes y de ser factibles de desarrollo en nuestro medio local:

- Si bien los resultados obtenidos son alentadores, en lo que respecta al diseño de la mezcla de hormigón poroso y los ensayos realizados en laboratorio, debería realizarse un estudio exhaustivo de la influencia del modo de compactación de probetas en la resistencia a compresión del hormigón, debido a la dificultad de simular la compactación en obra para pavimentos de hormigón poroso.
- La capacidad de infiltración de la superficie de hormigón poroso es de suma importancia en el diseño del pavimento permeable, siendo interesante poder evaluar la misma en parcelas de prueba realizadas en campo. Esta capacidad podría medirse en forma directa con el uso de permeámetros o de forma indirecta con un microsimulador de lluvia de dimensiones reducidas, que posee el Laboratorio de Hidráulica de la Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional Córdoba. La ventaja de este último sobre el primero radica en que reproduce el proceso a simular (lluvia) de un modo más verosímil, por lo cual es de esperar resultados más cercanos a los que se obtendrán en los ensayos posteriores. Esto permitiría comparar los resultados de permeabilidad obtenidos en laboratorio y en campo, estudiar su variabilidad y determinar factores de seguridad para el diseño de pavimentos permeables en función de la utilización de datos obtenidos en laboratorio.
- En este trabajo se llevó a cabo una simulación con el programa SWMM 5.1. para poder evaluar el comportamiento dentro de un estacionamiento de un pavimento permeable de hormigón poroso y un pavimento de hormigón convencional. Los datos utilizados en las simulaciones fueron obtenidos de laboratorio, por recomendaciones o tablas. Debido a esto sería interesante la construcción de parcelas de pruebas, o por ejemplo, dársenas de estacionamientos de hormigón poroso y convencional para monitoreo y obtención de datos de diseño para pavimentos de hormigón poroso a nivel local. No siendo menos interesante el estudio de la

variación en la capacidad de infiltración a lo largo del tiempo, posible colmatación de la superficie de hormigón poroso y desarrollo de sistemas de limpieza adecuado a este tipo de pavimento permeable.



## **REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**





## A

ACI Committee 330. (2001). Guide for Design and Construction of Concrete Parking Lots. ACI 330R-01. American Concrete Institute.

Acioli, L.A.; Agra, S.G.; Goldenfum, J.A. & Silveira A. (2004). Experimental study of permeable reservoir pavements for surface runoff control at source in a subtropical region. NOVATECH'2004, Sustainable Techniques and Strategies in Urban Water Management, 5 International Conference; Lyon: Graie; pp 771-778

Acioli L.A.; Da Silveira, A.L.L. & Goldenfum, J.A. (2005). Experimental study of permeable reservoir pavements for surface runoff control at source. 10th International Conference on Urban Drainage, 21-26 August, 2005, Copenhagen, Denmark

Aguado, A.; Dolz, J. & Rosell, J.J. (1986) "Aproximación al Hormigón Poroso", revista Carreteras, N° 21, enero-febrero 1986, 29-40.

Aguado, A.; Rosell, J.J.; Josa, A. & Jofre, C. (1992). XIX Semana de la Carretera Asociación Española de la Carretera. Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha. Toledo, Octubre de 1992.

Aguado, A.; Dolz, J. & Rosell, J.J. (1986). Aproximación al hormigón poroso. Un material permeable y resistente. Rev. Carreteras n°21. 3° época. Enero-Febrero.

Aguado, A. (1995). Nuevas tendencias en los hormigones porosos. VII Jornada del Hormigón del Gremi de Constructors d'Obres de Barcelona i Comarques.

Aguado, A.; Josa, A. & Pindado, M. A. (1997). Caracterización experimental y numérica de hormigones porosos modificados con polímeros. Proyecto Brite-Euram BE-3415. Barcelona: Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA).

Alegre Beneria, J. & Xarles Romeu, E. (1996). Hormigón poroso en pavimentos urbanos. Universitat Politècnica de Catalunya.

A.R.C. (2001). Georgia Stormwater Management Manual. Volume 1: Stormwater Policy Guidebook. First Edition: State of Georgia. Atlanta Regional Commission, Atlanta.

## **B**

Bayón, J.R.; Castro, D.; Moreno-Ventas, X.; Coupe, S.J. & Newman, A.P. (2005). Pervious pavement research in Spain: Hydrocarbon degrading microorganisms. 10th International Conference on Urban Drainage, 21-26 August, 2005, Copenhagen, Denmark.

Bendtsen H., Andersen B., Ruth B., Phillips J. & Dunning M. (2005). Noise-reducing pavements for highways and urban roads - State of the art in Denmark. Asphalt paving technology: Association of Asphalt Paving Technologists - Proceedings of the Technical Sessions 74, pp 1085-1105.

Bertoni, J.C. (2004). (Ed). Ambrosino, S., Barbeito, O., Bertoni, J.C., Daniele, A., Adolfo Maza, J., Paoli, J.U. & Serra, J.C. Inundaciones Urbanas en Argentina. Global Water Partnership, GWP-SAMTAC. Ed. GWP-SAMTAC. ISBN 987-9406-76-1.

Bertoni, J.C. (2006). Material de Capacitación: Curso sobre Gestión de Inundaciones en áreas urbanas. Programa de Capacitación Para Gestores y Tomadores de Decisión Públicos en el campo de los Recursos Hídricos. Asociación Mundial del Agua- Comité Técnico Asesor Sud América (GWP-SAMTAC).

Bertoni, J.C. (2006). Artículo de revista brindado por el autor. Fuente: Artículo revista UNICA- Inundaciones Urbanas 2006.

Brattebo B.O. & Booth D.B. (2003). "Long-term stormwater quantity and quality performance of permeable pavement systems". Water Research 37. pp. 4369-4376.

## **C**

Caamaño Nelli, G. (2003). Lluvias de diseño: conceptos, técnicas y experiencias. Editorial Universitas. ISBN: 9879406435. 222 páginas.

Caamaño Nelli, G. E. & Garcia, C. M. (1997). Estimación de Máximos en Hidrología: Factores de Frecuencia Normal y Lognormal. Cuadernos del CURIHAM, Año 3, N° 3, 1-17. UNR. Rosario, Argentina.

Caltrans (2007). Treatment BMP Technology Report. California Department of Transportation (Caltrans) Division of Environmental Analysis. Final Report. CTSW-RT070167.02.02 April.

Camposano Luque, J. (2012). Presentación 4° Congreso Iberoamericano de pavimentos de concreto – Sostenibilidad y Durabilidad- “El hormigón trabajando a tracción”. Guayaquil.

Castro D., Bayón J.R., Rodríguez J. & Ballester F. (2005). Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS). *Interciencia*, May, Vol. 30 N°5 pp. 255-260.

Castro, J.; Solminihaç, H.; Videla, C. & Fernández, B. (2009). Estudio de dosificaciones en el laboratorio para pavimentos poroso de hormigón, *Revista Ingeniería de Construcción*, Vol. 24, N°3, pp 271-284.

Chindaprasirt, P.; Hatanaka, S.; Chareerat, T.; Mishima, N. & Yuasa, Y. (2008). Cement paste characteristics and porous concrete properties, *Revista Elsevier, Construction and Building Materials* N°22, 894–901.

Chow, V.T., Maidment, D.R. & Mays, L.W. (1994). *Hidrología Aplicado*. Mc Graw Hill. ISBN:958-600-171-17.

Coupe, S.J.; Smith, H.G.; Newman, A.P. & Puehmeier, T. (2003). Biodegradation and microbial diversity within permeable pavements. *European Journal of Protistology* 39: 495-498.

Crouch, L.; Smith, N.; Walker, A.; Dunn, T. & Sparkman, A. (2005). Determining Pervious PCC Permeability whit a Simple Triaxial Flexible – Wall Constant Head Permeameter. United States: Tennessee Concrete Association.

## D

Darcy, H, (1856). *Les fontaines publiques de la ville de Dijon. Exposition et application des principes à suivre et des formules à employer dans les questions de distribution d'eau: ouvrage terminé par un appendice relatif aux fournitures d'eau de plusieurs villes au filtrage des eaux et à la fabrication des tuyaux de fonte, de plomb, de tôle et de bitume*. Libraire des corps impériaux des ponts et chaussées et des mines. Victor Dalmont, Editeur. Paris.

Das, B.M. (2001). *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica*, Thomson Learning.

Day, G.; Smith, D. & Bowers, J. (1981). Runoff and Pollution Abatement Charateristics of Concrete Grid Pavements. Bulletin 135, Virginia polytechnic Institute and State University, Virginia 24060, USA.

De Solminihac, H. & Castro, J. (2002). "Pavimentos porosos de hormigón: una opción para mitigar los efectos de las aguas lluvias". Revista BIT, Junio.

De Solminihac, H.; Videla, C.; Fernández, B. & Castro, J. (2007). Desarrollo de mezclas de hormigón poroso para pavimentos urbanos permeables. Revista Materiales de Construcción, Vol. 57, 287, pp 23-36.

## **E**

Ecocreto (2007). Garantía de agua para el futuro. [www.ecocreto.com.mx](http://www.ecocreto.com.mx) [última fecha de consulta 17/03/2017]

EPA. (1999), Storm Water Technology Fact Sheet, Porous Pavement, EPA 832- 99-023. Washington, D.C., Estados Unidos.

EPA (1999a). Preliminary Data Summary of Urban Storm Water Best Management Practices. Washington: United States Environmental Protection Agency, Office of Water. August. EPA 921R-99-012.

EPA (1999b). Storm Water Technology Fact Sheet. Porous Pavement. Washington: United States Environmental Protection Agency, Office of Water. September. EPA 832-F-99-023.

EPA: Environmental Protection Agency

EPA – NPDES (2009). Pervious Concrete Pavement. United States Environmental Protection Agency (EPA)-National Pollutant Discharge Elimination System (NPDES).

## **F**

Fach S. & Geiger W.F. (2005). "Modelling sorption of 3 heavy metals by porous pavements". 10th International Conference on Urban Drainage, 21-26 August, 2005, Copenhagen, Denmark.

FCPA, Florida Concrete and Products Association (1990), Construction of Portland Cement Pervious Pavement, Florida, Estados Unidos.

Ferguson, B.K. (2005). Porous pavements. Boca Raton: CRC Press. Taylor & Francis. Integrative Studies in Water Management and Land Development; 6. Series Editor Robert L. France. ISBN: 0-8493-2670-2.

Ferguson, B.K. (2006). Porous pavements: the making of progress in technology and design. 8th International Conference on Concrete Block Paving. November 6-8. San Francisco, California USA pp. 11-16.

Fernandez, L.; Vitola, L. & Salminci, P. (2001). Estado del arte en el uso de hormigones porosos en Argentina. Instituto del Cemento Pórtland.

Field, R.; Masters, H. & Singer, M. (1982). Status of porous pavement research. Water Research, Vol. 16, Issue 6, pp. 849-858.

## **G**

García Haba, E. (2011). Control de escorrentías urbanas mediante pavimentos permeables: aplicación en climas mediterráneos. Tesis de Maestría. Universidad Politécnica de Valencia. Páginas 218

GCPA, Georgia Concrete and Products Association (1999), Recommended Specifications for Portland Cement Pervious Pavement, Georgia, Estados Unidos.

GCPSP. (2005). Gold Coast Planning Scheme Policies. Policy 11: Land Development Guidelines. Section 13 Water Sensitive Urban Design (WSUD) Guidelines. 13.11 Porous and Permeable Paving. Australia.

Goacolou H. (1993). "Chaussees-Reservoirs". XII Congreso Mundial IRF. Madrid: Asociación Española de la Carretera. Tomo 4. pp. 605-614 ISBN: 84-88661-06-1

Gordillo, J. (2001). Panorámica general de las mezclas bituminosas, Jornadas sobre caracterización y control de calidad de mezclas bituminosas. Sevilla, España.

GRACE. (2009). Sustainable Design and Permitting of Pervious Concrete. EPA Sustainable Communities Conference. Matt Offenber, PE.

Grover W.C., Hoiberg A.J. & Haigh T.I. (1972). Investigation of porous pavements for urban runoff control. Water Pollution Control Research Series: 11034 DUY. US Government Printing Office, Washington DC.

Guglielmo, R. (1996). Les grandes metropoles du monde et leur crise, Ed. A.Colin, Paris, 268 p.

## H

<https://www.un.org/es/millenniumgoals/environ.shtml>. ONU. Objetivos de Desarrollo del Milenio (ODM). 2000.

<https://www.un.org/spanish/milenio/ares552.pdf>. Declaración del Milenio. Resolución aprobada por la Asamblea General de las Naciones Unidas (A/res/55/2). 13/09/2000.

Hartwell, S.; Diyagama, T.; Van Huyssteen, A.; Lee, H. & Shaw, H. (2004). Permeable Pavement Design Guidelines. New Zealand.

Hogland, W.; Niemczynowicz, J. & Wahlman, T. (1987). The Unit Superstructure during the construction period. *Sci.Tot.Env*, 59, pp.411-424.

Horton, R. E. (1939). Analysis of runoff-plot experiments with varying infiltration capacity. *Transactions American Geophysical Union*, Washington, p. 693-711.

Huber, W., & Dickinson, R. (1992). *Stormwater Management Model, Version 4: User's Manual*. EPA 600/3-88/001a. Athens, Georgia: Environmental Research Laboratory.

## I

ICPA. (2014). *Manual de Diseño y Construcción de Pavimentos de Hormigón*. Instituto del Cemento Pórtland Argentino. Buenos Aires, Argentina. ISBN: 978-950-677-003-7.

INDEC. *Censo Nacional de Población y vivienda*. (1991). *Censo Nacional de Población, hogares y viviendas 2001 y 2010*. Total de Población. Población Urbana y Rural.

Interpave. (2010). *Permeable Pavements. Guide to the design, construction and maintenance of concrete block permeable pavements*. Leicester LE1 1FB.s

## K

Kevern, J.; Wang, K.; Suleiman, M.T. & Schaefer, V.R. (2006). *Pervious Concrete Construction: Methods and Quality Control*. NRMCA Concrete Technology Forum: Focus on Pervious Concrete. Nashville, TN.

Knapton, J. & Cook, I.D. (2006). Innovative features of Jersey airport's new fire. 8th International Conference on Concrete Block Paving. November 6-8. San Francisco, California USA pp. 103-118.

## L

Legret M. (2001). "Pollution et impact d'eaux de ruissellement de chaussées". Routes CR 27 Études et Recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC).

## M

Matt Offenberg, P.E. (2009). Sustainable Design and Permitting of Pervious Concrete". EPA Sustainable Communities Conference.

McBride, C. & Knapton, J. (2006). The design of permeable pavements for retail development in Ireland. 8th International Conference on Concrete Block Paving. November 6-8. San Francisco, California USA pp. 83-92.

McCormack T. (2006). Pavingexpert CD-rom. <http://www.pavingexpert.com/pavindex.htm> [última fecha de consulta 15/07/2010].

Membrillo Medrano J. M. (1995). Técnicas especiales de conservación de firmes flexibles. V Jornadas de Conservación de Carreteras. Los contratos de conservación. pp. 279-296.

M.I.N.V.U. (1996). Ministerio de Vivienda y Urbanismo. Técnicas alternativas para soluciones de aguas lluvias en sectores urbanos, guía de diseño, Chile.

Mulder, K. (2007). Desarrollo sostenible para ingenieros. Barcelona: Ediciones UPC. Título original: Sustainable development for ingenineers. Traductora: Mariana Donadini. ISBN: 978-84-8301-892-7

Mulligan, A. (2005). Attainable compressive strength of pervious concrete paving systems. United States: Univesity of Central Florida.

## N

National Ready Mixed Concrete Association (NRMCA). (2010). "Pervious Concrete Testing", disponible online en: <http://www.nrmca.org/>

National SUDS Working Group (2003). Framework for Sustainable Drainage Systems (SUDS). In England and Wales. TH-5/03-3k-C-BHEY. 75 p

Navas Carro, A. & Fernández, R. (2011). Diseño de mezclas para evaluar su resistencia a la compresión uniaxial y su permeabilidad. Revista Infraestructura Vial, Vol. 13, 40-49.

Neithalath, N.; Weiss J. & Olek J. (2006). Predicting the Permeability of Pervious Concrete (Enhanced Porosity Concrete) from Non-Destructive Electrical Measurements. Unites State: Purdue University.

Newman, A.P.; Pratt, C.J.; Coupe, S.J. & Cresswell, N. (2002). Oil bio-degradation in permeable pavements by microbial communities. Wat. Sci. Tech., 45 (7). , 51-56.

Newman, A.P.; Schuttleworth, A.; Puehmeier, T.; Wing, Ki K. & Pratt, C.J. (2003). Recent Developments in Oil Retaining Porous Pavements. 2nd National Conference on Urban Drainage. Coventry, UK. June.

Newman, A.P., Coupe, S.J. & Robinson, K. (2006). Pollution retention and biodegradation within permeable pavements. 8th International Conference on Concrete Block Paving. November 6-8 San Francisco, California USA pp. 171-180.

Norma ASTM C618. (2003). Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete<sup>1</sup>. ASTM, 4pp.

Norma ASTM C1611. (2014). Standard Test Method for Slump Flow of Self-Consolidating Concrete. ASTM, 4pp.

Norma ASTM C1688. (2014). Standard Test Method for Density and Void Content of Freshly Mixed Pervious Concrete. ASTM, 4pp.

Norma IRAM 1505. (2003). Agregados. Análisis granulométrico. Aggregates. Particle size distribution analysis. IRAM, 16 pp.

Norma IRAM 1520. (2002). Agregados finos. Métodos de laboratorio para la determinación de la densidad relativa real, de la densidad relativa aparente y de la absorción de agua. IRAM, 16 pp.

Norma IRAM 1533. (2002). Agregados Gruesos. Método de laboratorio para la determinación de la densidad relativa real, de la densidad relativa aparente y de la absorción de agua. IRAM, 12 pp.



Norma IRAM 1536. (1978). Hormigón fresco de cemento pórtland. Método de ensayo de la consistencia utilizando el tronco de cono. IRAM, 12 pp.

Norma IRAM 1546. (2013). Hormigón de cemento. Método de ensayo de compresión. Cement concrete. Compression test method. IRAM, 13 pp.

Norma IRAM 1547. (1992). Hormigón de cemento pórtland. Ensayo de tracción por flexión. IRAM, 16 pp.

Norma IRAM 1548. (2003). Agregados. Determinación de la densidad a granel y de los espacios vacíos. IRAM, 16 pp.

Norma IRAM 1553. (2008). Hormigón de cemento. Preparación de las bases de probetas cilíndricas y testigos cilíndricos, para ensayo de compresión. IRAM, 22 pp.

Norma IRAM 1601. (2012). Agua para morteros y hormigones de cemento. Water for mortars and cement concretes. IRAM, 22 pp.

Norma IRAM 1627. (1997). Agregados. Granulometría de los agregados para hormigones. IRAM, 23 pp.

Norma IRAM 1663. (2002). Hormigón de cemento. Aditivos químicos. IRAM, 23 pp.

Norma IRAM 50000 (2014). Cemento. Cemento para uso general. Composición, características, evaluación de la conformidad y condiciones de recepción. Cement. Common cement. Composition, specifications, conformity evaluation and reception conditions. IRAM, 42 pp.

## **P**

Paine, J. (1992). Portland cement pervious pavement construction. Concrete Construction Journal. Estados Unidos.

Pagotto, C.; Legret, M. & Le Cloirec, P. (1999). Comparison of the hydraulic behaviour and the quality of highway runoff water according to the type of pavement. Water Research Vol. 34, No. 18. pp. 4446-4454.

Pérez Jiménez, F.E., Kraemer, C. & Lacleta, A. (1982). Mezclas Bituminosas Porosas. Madrid: MOPU, Dirección General de Carreteras, Servicio de Tecnología.

Pratt C.J. (1999a). Developments in permeable pavements: further observations on mineral oil bio-degradation". Proceedings Standing Conference on Stormwater Source Control. Vol. XVII. ISBN 0 905949 80 3.

Pratt C.J (1999b). Use of permeable, reservoir pavement constructions for stormwater treatment and storage for re-use. Water Science and Technology, Vol. 39, No. 5, pp. 145-151.

Pratt, C.J. (2004). Sustainable urban drainage. A review of published material on the performance of various SUDS devices prepared for the Environment Agency (UK). February.

Pratt, C.J.; Mantle, J.D.G. & Schofield, P.A. (1995). UK research into the performance of permeable pavement, reservoir structures in controlling stormwater discharge quantity and quality. Water Science and Technology, Vol. 32, No. 1, pp. 63-69.

Pratt C.J.; Newman A.P. & Bond P.C. (1999). Mineral oil bio-degradation within a permeable pavement. Water Science and Technology, Vol.39 No.2, pp103-109.

Pratt, C.J.; Newman, A.P. & Brownstein, J.B. (1996). Bio-remediation processes within a permeable pavement: initial observations. En: Seventh International Conference on Urban Storm Drainage, F. Sieker and H. R. Verworn (Eds.), Hannover, ISBN 3 00 00860 8, pp. 1455-1460.

Pratt, C.J.; Wilson, S. & Cooper, P. (2002). Source control using constructed pervious surfaces. Hydraulic, structural and water quality performance issues. London: CIRIA; CIRIA C582, RP637; 152 p.

Puehmeier T.; Coupe S.J.; Newman A.P.; Shuttleworth A. & Pratt C.J. (2004). Recent developments in oil degrading pervious pavement systems-improving sustainability. NOVATECH'2004, Sustainable Techniques and Strategies in Urban Water Management, 5 International Conference. Lyon: Graie; ISBN: 2-9509337-6-9, pp. 811-818.

## R

- Raimbault, G. (1990). Reservoir structures: an extension of the possibilities of porous pavements. Proc. 5th Int. Conf. on Urban Storm Drainage, Osaka, Japan, pp.833-838.
- Raimbault, G. (1993a). French researches on reservoir structure hydraulics. Proc. 6th Int. Conf. on Urban Storm Drainage, Niagara Falls, Canada, ISBN 1 55056 254 1, pp.1121-1126.
- Raimbault, G. (1993b). New designs for reservoir structures. Proc. 6th Int. Conf. on Urban Storm Drainage, Niagara Falls, Canada, ISBN 1 55056 254 1, pp.1127-1132.
- Raimbault G., Baladés J.D. & Faure-Soulet A. (1985). Quatre expérimentations françaises de chaussées poreuses. Bul. Liaison P et Ch. N° 137.
- Rautenberg, D.P.; Monetti, M.; Positieri, M.J. & Baronetto C. (2011). Contribución al Diseño de Hormigones Porosos con Materiales Locales. XVIII Jornadas Chilenas del Hormigón. Santiago de Chile.
- Reglamento CIRSOC 201. (2005). Reglamento Argentino de Estructuras de Hormigón. Instituto Nacional de Tecnología Industrial. Pp 666.
- Reporte ACI 522-R06. (2006). "Pervious Concrete".
- Rivera, P.; Fernández, B. & Montt, J.P. (2003). Uso de Pavimentos Permeables. Revista BIT. Revista Técnica de Construcción 33: 54-56.
- Rivera, P.; Montt, J. P. & Fernández, B. (2003). Instalación piloto de pavimentos permeables para la gestión de aguas lluvias: descripción y resultados experimentales. Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica. XVI Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica. Depto. Ingeniería Hidráulica y Ambiental, P. Universidad Católica de Chile.
- Rodríguez Hernández, J. (2008). Estudio, análisis y diseño de secciones permeables de firmes para vías urbanas con un comportamiento adecuado frente a la colmatación y con la capacidad portante necesaria para soportar tráfico ligero. Tesis Doctoral. Universidad de Cantabria.
- Rossman, L. (2004). Stormwater Management Model User's Manual. Version 5.0. Cincinnati, OH: USEPA.

## S

Sañudo Fontaneda, L.A., Rodríguez Hernández, J. & Castro Fresno, D. (2012). Diseño y construcción de sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS). E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.

Schlüter, W. & Jefferies, C. (2002). Modelling the outflow from a porous pavement. Urban Water. Volume no 4. pp. 245-253.

Scholz M. & Grabowiecki P. (2007). Review of Permeable Pavement Systems. Building and Environment. doi:10.1016/j.buildenv.2006.11.016.

Schueler, T. (1987). Controlling urban runoff: a practical manual for planning and designing urban BMPs. Appendix A. Department of Environmental Programs. Metropolitan Washington Council of Governments. Washington, D.C. Smith

Shackel B. (2006). Design of permeable paving subject to traffic. 8th International Conference on Concrete Block Paving. November 6-8. San Francisco, California USA pp. 51-60.

Smith, D. (2000). Permeable Interlocking Concrete Pavements. Interlocking Concrete Pavement Institute, Washington, DC 20005-6542, USA.

Solminihaç, H & Castro, J. (2002). Pavimentos porosos de Hormigón: Una opción para mitigar los efectos de las aguas de lluvias. Artículo Revista BIT, Junio 2002. Pág. 35-8.

Steffen, H.S. & Meinheit, J. (2006). Practical experiences and general principles for hydro active traffic areas in Germany. 8th International Conference on Concrete Block Paving. November 6- 8. San Francisco, California USA pp. 17-26.

Stream Corridor Restoration: Principles, Processes and Practice. FISRWG. 2001. Extraído de [http://www.ecrr.org/publication/guidelines\\_doc6.pdf](http://www.ecrr.org/publication/guidelines_doc6.pdf).

## T

Tucci C.E.M. & Porto, R.L. (2001). Storm Hydrology and Urban Drainage. Tucci, C. Humid Tropics Urban Drainage, Capítulo 4. UNESCO.

Tucci, C.E.M. (2006). Gestión de Inundaciones Urbanas. Porto Alegre, Brasil. Revisión general de la versión hispana e incorporación de estudios de casos por Bertoni, J.C.

## U

U.S.EPA. (1980). Porous Pavement: Phase I - Design and Operational Criteria. E. V. Diniz, espey, Hustn & Associates, Inc., Albuquerque, NM, EPA-600/2-80-135 (NTIS PB 81 104 138). Environmental Protection Agency.

## V

Virginia DCR Stormwater (2011). Especificación de diseño N° 7: "Pavimentos Permeables". Versión 1.7, Marzo de 2011.

## W

Weber, J. F. (2015). Eficiencia Relativa de Modelos de Infiltración: Caso Ciudad de Córdoba (Argentina). XXV Congreso Nacional del Agua – CONAGUA2015 - 15 al 19 de junio de 2015 - Paraná, Entre Ríos.

Weber, J. F. & Reyna, S. M. (2016). Medición en laboratorio de la capacidad de infiltración en suelos mediante un simulador de lluvia. XXVII Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Lima, Perú, 28 al 30 de Setiembre de 2016.

Woods-Ballard, B.; Kellagher, R.; Martin, P.; Jefferies, C.; Bray R. & Shaffer, P. (2007). The SUDS Manual. CIRIA C697. London.

## Y

Yang, J. & Jiang, G. (2003). Experimental study on properties of pervious concrete pavement materials. Cement and Concrete Research 33, pp. 381-386.





