



**UNIVERSIDAD DE CANTABRIA**

**Escuela Técnica Superior de Ingenieros  
de Caminos, Canales y Puertos**



**TESIS DOCTORAL**

*Ph.D. thesis*

**ANÁLISIS DE LA INFILTRACIÓN DE AGUA DE LLUVIA EN FIRMES PERMEABLES CON  
SUPERFICIES DE ADOQUINES Y AGLOMERADOS POROSOS PARA EL CONTROL EN  
ORIGEN DE INUNDACIONES**

***THE ANALYSIS OF RAINWATER INFILTRATION INTO PERMEABLE PAVEMENTS, WITH CONCRETE  
BLOCKS AND POROUS MIXTURES, FOR THE SOURCE CONTROL OF FLOODING***

Autor / Author

MSC. LUIS ÁNGEL SAÑUDO FONTANEDA

Directores / Advisors

DR. DANIEL CASTRO FRESNO

DR. JORGE RODRÍGUEZ HERNÁNDEZ

Santander, Junio 2014









Esta tesis está dedicada a mis fuentes de inspiración en la vida. Gracias a mi esposa, padres, hermano, y a la hermosa memoria de mis queridos abuelos.

*This thesis is dedicated to my source of inspiration in life. Thanks to my wife, parents, brother, and the beautiful memory of my dear grandparents.*



## **AGRADECIMIENTOS**

Quiero expresar en primer lugar mi gratitud al Ministerio de Economía y Competitividad del Gobierno de España por la financiación de mi actividad investigadora, a través de la Beca de Formación del Personal Investigador (FPI), enmarcada en el proyecto “Desarrollo de sistemas de captación y almacenamiento de agua de lluvia, mediante firmes filtrantes en aparcamientos de tráfico ligero, para su valorización en usos no potables y empleo como medio de aprovechamiento de energía geotérmica de baja entalpía (VEA)”, con referencia BIA2009-08272, perteneciente al Plan Nacional de I+D+i 2008-2011, y mediante el cual se ha desarrollado esta tesis doctoral.

Me gustaría agradecer muy especialmente al Grupo de Investigación de Tecnología de la Construcción (GITECO) de la Universidad de Cantabria por darme la oportunidad de comenzar mi carrera investigadora en el grupo.

Gracias a mis directores de tesis, los doctores Daniel Castro Fresno y Jorge Rodríguez Hernández, por su supervisión y consejos durante mi etapa profesional en la Universidad de Cantabria. Gracias también por vuestro apoyo personal.

Gracias al Grupo de Caminos de Santander de la Universidad de Cantabria por su valiosa colaboración y soporte, al permitirme usar las instalaciones del Laboratorio de Caminos y Aeropuertos durante el desarrollo de parte de esta tesis, y aconsejarme en el uso de las instalaciones y el desarrollo de los ensayos.

Gracias a las empresas Bloques Montserrat S.L., DANOSA, SENOR, SIEC, ASCAN y ADIECO SOSTENIBLE por su inestimable colaboración en la aportación de material para el desarrollo de esta tesis.

Gracias al Sustainable Drainage Applied Research Group (SUDSARG) de la Universidad de Coventry por recibirme en la realización de mi estancia pre-doctoral y por ofrecerme un futuro profesional prometedor. Gracias a mis compañeros, técnicos de laboratorio y supervisores durante mi estancia, y sobre todo a la familia Coupe por acogerme en tantas ocasiones entre ellos.

Gracias a todas las personas que me han ayudado en la realización de esta tesis, destacando de entre todos ellos a Valerio por su gran esfuerzo y apoyo incondicional, y a Natalia por su desinteresada dedicación y cariño en todas las labores literarias de revisión en la tesis y en los artículos fruto de los resultados de la misma.

Por último, y de la forma más especial, quisiera agradecer profundamente a mis compañeros en el GITECO de la Universidad de Cantabria. Gracias por vuestra amistad, por vuestro apoyo cuando más lo he necesitado y por hacerme sentir especial y feliz entre vosotros. Allá donde me lleve la vida, siempre tendréis un lugar en mi corazón. Ha sido un gran placer trabajar con vosotros.

Gracias a mi familia y amigos por su cariño y apoyo.

## **ACKNOWLEDGEMENTS**

First of all, I wish to express my gratitude to the Spanish Ministry of Economy and Competitiveness for its financial support of my research activity, through the Research Fellowship FPI which was part of the project entitled “Development of systems for rainwater catchment and storage through permeable pavements to assess its non-potable uses and as resource of low-enthalpy geothermal energy (REV)”. This project was part of the National Plan of Research, Development and Innovation for the period 2008-2011 of the Spanish Government as well.

I wish to thank very especially to the Construction Technology Applied Research Group (GITECO) of the University of Cantabria for giving me the opportunity to start my research career in the group.

Thanks to my thesis advisors, doctors Daniel Castro Fresno and Jorge Rodríguez Hernández, for their supervision and advise during my professional stage in the University of Cantabria. Many thanks for your personal support as well.

Thanks to the Highways Research Group of the University of Cantabria for their valuable collaboration and support, allowing me to use their laboratory facilities and advising me about their correct use.

I would like to express my gratitude to the companies Bloques Montserrat S.L., DANOSA, SENOR, SIEC, ASCAN y ADIECO SOSTENIBLE for their valuable collaboration.

I am very grateful for the support of the Sustainable Drainage Applied Research Group (SUDS ARG) of Coventry University during my pre-doctoral research internship and for giving me a promising professional future. Thanks to my colleagues, laboratory technicians and advisors during my stay, and above all I would like to express my deepest personal gratitude to the family Coupe for their support and love.

Especial thanks to all the people who have helped me during the development of this thesis, highlighting between all of them Valerio for his great efforts and unconditional support, and Natalia for her selfless dedication on the reviewing labours of the thesis and the research articles from it.

I wish to thank in a very special manner my colleagues in the GITECO of the University of Cantabria. Thanks for your friendship, and your support when I most needed and for making me feel happy between all of you. Wherever I go you will always have a place in my heart. It has been a huge pleasure to work with you during these years.

Thanks to my family and friends for their love and support.

## RESUMEN

Los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) son la principal solución para la gestión integral y sostenible del agua de lluvia. De entre las técnicas SUDS destacan principalmente los firmes permeables como la técnica más completa y una de las más utilizadas. Como objetivo de esta investigación se plantea el estudio detallado de la infiltración del agua de lluvia a través de los firmes permeables, considerados como sistemas de captación del agua de lluvia para el control en origen de la escorrentía urbana, con el fin último de ayudar a evitar inundaciones en el entorno urbano de una forma sostenible. Las secciones de firmes permeables estudiadas en esta tesis doctoral han sido el resultado de la combinación de las superficies con mayor repercusión a nivel mundial (hormigón poroso, adoquines impermeables con ranuras y asfalto poroso) con capas base y sub-base de árido calizo. Además, se dispuso una capa de geotextil entre las capas granulares, realizándose el estudio específico de un nuevo material llamado OASIS®, empleado por primera vez a nivel mundial en firmes permeables. Para ahondar en el conocimiento del comportamiento hidráulico de los firmes permeables se llevaron a cabo ensayos de medida de la capacidad de infiltración y generación de escorrentía en laboratorio con Infiltrómetro Cántabro Fijo (ICF) mejorado, estudiando diferentes pendientes y escenarios de colmatación; ensayos de comportamiento hidráulico de un firme permeable en laboratorio, incluyendo el nuevo material OASIS®; y ensayos de medida de la drenabilidad de superficies porosas en laboratorio y en campo con el Permeámetro LCS, analizando la pérdida de la capacidad de infiltración a lo largo del tiempo. Fruto de la discusión de los resultados, se han obtenido modelos de regresión que permiten entender el comportamiento de un pavimento permeable en condiciones extremas de colmatación en función de la pendiente de la superficie; se ha demostrado la gran eficacia de la capa de OASIS® en la atenuación de grandes volúmenes de agua pluvial, retardando y reduciendo los picos de ésta que se producen debido a lluvias extremas; y se ha validado una metodología para el diagnóstico en campo de la capacidad de infiltración de los firmes permeables con superficies porosas. Con todo, se ha cumplido el objetivo de partida, demostrando que las metodologías desarrolladas en esta investigación permiten diseñar, validar y mantener distintas secciones de firmes permeables capaces de minimizar las inundaciones en las ciudades. La adaptación de estas metodologías al estudio hidráulico de otros SUDS y el análisis más en profundidad del producto OASIS®, se plantean como las dos líneas de investigación futuras de mayor importancia derivadas de esta tesis.





## ABSTRACT

Sustainable Urban Drainage Systems (SUDS) are the main solution for the integral and sustainable rainfall management. Permeable pavements stand out among SUDS techniques as the most comprehensive and used technique. The study of rainfall infiltration through permeable pavements in detail, considered as catchment systems for runoff source control for helping to avoid flooding problems in a sustainable way is the main purpose of this research. Permeable pavement sections studied in this thesis have been the result of the combination between those most used permeable surfaces across the world (porous concrete, impervious concrete blocks with slots and porous asphalt) and base and sub-base aggregates layers. Moreover, a geotextile layer was placed between the aggregates layers, carrying out the study of a new material called OASIS® that is used for the first time ever within a study of the hydraulic performance of permeable pavements. Several tests were designed and developed to obtain a further knowledge about the hydraulic behaviour of a permeable pavement. Tests such as the assessment of the infiltration capacity of a permeable pavement in laboratory by using the improved Cantabrian Fixed Infiltrometer (CFI), analyzing several slopes and clogging scenarios; test of permeable pavement hydraulic behaviour in laboratory, including the new material OASIS®; and test of the drainability assessment of porous mixtures surfaces both in laboratory and in field by using the LCS permeameter, analyzing the reduction of the infiltration of these surfaces during their operational life. As a result of these tests, regression linear models have been obtained, allowing understanding the hydraulic performance of permeable pavements under extreme conditions of clogging depending on the type of surface; the efficiency of the OASIS as an attenuation element within the structure of a permeable pavement has been demonstrated based on its great storage capacity, delaying and reducing the peak-flow due to extreme rainfall events; and finally a methodology for the diagnosis of the infiltration capacity of permeable pavements in field with porous surfaces has been validated. Consequently, the main purpose of this research has been achieved, demonstrating that all methodologies developed in this research allow designing, validating and maintaining several sections of permeable pavement, being able to minimize flooding problems in urban catchments. Adaptation of these methodologies to other SUDS techniques and the hydraulic study more in detail of the OASIS® are going to be the most remarkable future research lines that arise as a consequence of the research carried out in this thesis.



**TABLA DE CONTENIDOS**

<b>TABLA DE CONTENIDOS .....</b>	<b>I</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS .....</b>	<b>IX</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS .....</b>	<b>XIII</b>
<b>CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 MARCO Y JUSTIFICACIÓN DE LA TESIS.....</b>	<b>3</b>
<b>1.2 OBJETIVOS E HIPÓTESIS.....</b>	<b>5</b>
<b>1.3 ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO .....</b>	<b>7</b>
<b>1.4 INTRODUCCIÓN AL DRENAJE SOSTENIBLE.....</b>	<b>8</b>
1.4.1 Problemas asociados a la gestión del agua de lluvia en las ciudades .....	8
1.4.2 Soluciones para mejorar la gestión del agua de lluvia en las ciudades.....	10
1.4.3 Clasificaciones de los principales Sistemas de Drenaje Sostenible .....	17
1.4.4 Ventajas e Inconvenientes de los Sistemas de Drenaje Sostenible.....	21
<b>CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE .....</b>	<b>23</b>
<b>2.1 FIRMES PERMEABLES .....</b>	<b>25</b>
2.1.1 Definición y estructura.....	25
2.1.2 Tipologías .....	30
2.1.3 Ventajas e Inconvenientes.....	34
2.1.4 Funciones y Aplicaciones .....	37
2.1.5 Investigaciones llevadas a cabo .....	38
<b>2.2 INUNDACIONES.....</b>	<b>48</b>
2.2.1 Perspectiva general.....	48
2.2.2 Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia.....	50
<b>2.3 ESTUDIO DE LA INFILTRACIÓN DE AGUA EN UN FIRME PERMEABLE .....</b>	<b>54</b>
2.3.1 Principales variables.....	54
2.3.2 Instrumentos y ensayos .....	56
<b>CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL .....</b>	<b>61</b>
<b>3.1 MATERIALES DE LAS SECCIONES DE FIRMES PERMEABLES UTILIZADAS.....</b>	<b>63</b>

3.1.1	Selección de secciones de firmes permeables .....	63
3.1.2	Superficies permeables .....	64
3.1.2.1	<i>Adoquines con ranuras</i> .....	64
3.1.2.2	<i>Hormigón poroso</i> .....	65
3.1.2.3	<i>Asfalto poroso</i> .....	66
3.1.3	Base .....	67
3.1.4	Capa de separación y filtro .....	68
3.1.4.1	<i>Geotextil</i> .....	68
3.1.4.2	<i>OASIS®</i> .....	68
3.1.5	Sub-base .....	69
3.1.6	Secciones de firme utilizadas en los ensayos de campo .....	69
<b>3.2</b>	<b>ENSAYO DE MEDIDA DE LA CAPACIDAD DE INFILTRACIÓN DE UN PAVIMENTO PERMEABLE EN LABORATORIO .....</b>	<b>72</b>
3.2.1	Infiltrómetro Cántabro Fijo (ICF) .....	72
3.2.2	Construcción de los pavimentos permeables a analizar .....	80
3.2.3	Descripción del ensayo .....	86
3.2.3.1	<i>Condicionantes y etapas del ensayo</i> .....	86
3.2.3.2	<i>Variables del ensayo</i> .....	89
3.2.3.3	<i>Fundamentos teóricos del ensayo</i> .....	91
3.2.3.4	<i>Análisis de la capacidad de infiltración del geotextil en las secciones de pavimentos permeables con superficies de aglomerado poroso</i> .....	92
3.2.4	Sedimentos utilizados en la colmatación de las superficies permeables .....	93
3.2.4.1	<i>Selección de los sedimentos</i> .....	93
3.2.4.2	<i>Preparación de los sedimentos</i> .....	95
<b>3.3</b>	<b>ENSAYO DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO DE UN FIRME PERMEABLE EN LABORATORIO .....</b>	<b>99</b>
3.3.1	Simulador de lluvia .....	99
3.3.2	Construcción de las secciones de firmes permeables a analizar .....	103
3.3.3	Descripción del ensayo .....	106
3.3.3.1	<i>Condicionantes y etapas del ensayo</i> .....	106
3.3.3.2	<i>Variables del ensayo</i> .....	109
<b>3.4</b>	<b>ENSAYO DE MEDIDA DE LA DRENABILIDAD DE SUPERFICIES DE</b>	

<b>HORMIGÓN POROSO Y ASFALTO POROSO .....</b>	<b>111</b>
3.4.1 Permeámetro Laboratorio Caminos Santander.....	111
3.4.2 Construcción de las superficies permeables y de las secciones de firmes permeables a analizar .....	112
3.4.3 Descripción de los ensayos de laboratorio .....	112
3.4.4 Descripción de los ensayos de campo .....	113
<b>CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>117</b>
<b>4.1 ENSAYO DE MEDIDA DE LA CAPACIDAD DE INFILTRACIÓN DE UN PAVIMENTO PERMEABLE EN LABORATORIO .....</b>	<b>119</b>
4.1.1 Análisis de las tasas de infiltración de un pavimento permeable en laboratorio .....	119
4.1.1.1 <i>Modelos de regresión lineal para pavimentos permeables con superficies de adoquines con ranuras.....</i>	<i>124</i>
4.1.1.2 <i>Modelos de regresión lineal para pavimentos permeables con superficies de hormigón poroso reforzado con polímeros.....</i>	<i>128</i>
4.1.1.3 <i>Modelos de regresión lineal para pavimentos permeables con superficies de asfalto poroso .....</i>	<i>132</i>
4.1.2 Análisis de la escorrentía de un pavimento permeable en laboratorio ....	137
4.1.2.1 <i>Pavimento permeable con una superficie de adoquines con ranuras.....</i>	<i>138</i>
4.1.2.2 <i>Pavimento permeable con una superficie de hormigón poroso .....</i>	<i>142</i>
4.1.2.3 <i>Pavimento permeable con una superficie de asfalto poroso.....</i>	<i>145</i>
4.1.2.4 <i>Capacidad de infiltración del geotextil en las secciones de pavimentos permeables con superficies de hormigón poroso y asfalto poroso .....</i>	<i>148</i>
<b>4.2 ENSAYO DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO DE UN FIRME PERMEABLE EN LABORATORIO .....</b>	<b>151</b>
4.2.1 Análisis de las tasas de infiltración del firme permeable .....	151
4.2.1.1 <i>Sección de firme permeable CONTROL .....</i>	<i>151</i>
4.2.1.2 <i>Sección de firme permeable OASIS 1.3 .....</i>	<i>153</i>
4.2.1.3 <i>Sección de firme permeable OASIS 2.0 .....</i>	<i>155</i>
4.2.2 Fases de funcionamiento del OASIS® .....	157
4.2.3 Análisis del volumen almacenado en el firme permeable.....	164
<b>4.3 ENSAYO DE MEDIDA DE LA DRENABILIDAD DE SUPERFICIES DE</b>	

<b>HORMIGÓN POROSO Y ASFALTO POROSO .....</b>	<b>168</b>
4.3.1 Ensayos de medida de la drenabilidad en laboratorio.....	168
4.3.2 Ensayos de medida de la drenabilidad en campo .....	172
<b>CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>183</b>
<b>5.1 CONCLUSIONES .....</b>	<b>185</b>
5.1.1 Conclusiones generales .....	185
5.1.2 Conclusiones particulares.....	186
5.1.2.1 Estado del arte.....	186
5.1.2.2 Ensayo de medida de la capacidad de infiltración de un pavimento permeable en laboratorio.....	187
5.1.2.3 Ensayo del comportamiento hidráulico de un firme permeable en laboratorio.....	189
5.1.2.4 Ensayo de medida de la drenabilidad de superficies de hormigón poroso y asfalto poroso .....	190
<b>5.2 FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>192</b>
<b>5.3 RESULTADOS CIENTÍFICO ACADÉMICOS DE LA TESIS DOCTORAL.....</b>	<b>194</b>
<b>EXTENDED ABSTRACT .....</b>	<b>199</b>
<b>1. INTRODUCTION .....</b>	<b>201</b>
1.1 FRAMEWORK.....	201
1.2 OBJECTIVES AND HYPOTHESIS.....	203
<b>2. LITERATURE REVIEW .....</b>	<b>205</b>
2.1 RESEARCHES CARRIED OUT ON SUSTAINABLE URBAN DRAINAGE SYSTEMS (SUDS) AND PERMEABLE PAVEMENTS IN THE WORLD.....	205
2.2 EXTREME RAINFALL INTENSITIES.....	207
<b>3. RESEARCH METHODOLOGY.....</b>	<b>209</b>
3.1 MATERIALS.....	209
3.1.1 Selection of the sections of the permeable pavement used in laboratory .....	209
3.1.2 Permeable surfaces .....	210
3.1.2.1 Concrete blocks with slots .....	210

3.1.2.2	<i>Porous concrete</i> .....	210
3.1.2.3	<i>Porous asphalt</i> .....	211
3.1.3	Base layer .....	212
3.1.4	Separation and filtration layer .....	212
3.1.4.1	<i>Geotextile</i> .....	212
3.1.4.2	<i>OASIS®</i> .....	213
3.1.5	Sub-base layer .....	213
3.1.6	Permeable pavement sections used in the field experiments .....	215
<b>3.2</b>	<b>TEST OF THE ASSESSMENT OF THE INFILTRATION CAPACITY OF A PERMEABLE PAVEMENT IN THE LABORATORY</b> .....	<b>217</b>
3.2.1	Cantabrian Fixed Infiltrimeter (CFI) .....	217
3.2.2	Test description .....	219
<b>3.3</b>	<b>TEST OF PERMEABLE PAVEMENT HYDRAULIC BEHAVIOUR IN THE LABORATORY</b> .....	<b>226</b>
3.3.1	Rainfall simulator .....	226
3.3.2	Test description .....	228
<b>3.4</b>	<b>TESTING OF THE DRAINAGE FUNCTION ASSESSMENT OF POROUS MIXTURES SURFACES OF POROUS CONCRETE AND POROUS ASPHALT IN THE LABORATORY AND THE FIELD</b> .....	<b>233</b>
3.4.1	LCS Permeameter .....	233
3.4.2	Tests description .....	234
3.4.2.1	<i>Laboratory tests</i> .....	234
3.4.2.2	<i>Field tests</i> .....	235
<b>4.</b>	<b>RESULTS AND DISCUSSIONS</b> .....	<b>238</b>
<b>4.1</b>	<b>TEST OF THE ASSESSMENT OF THE INFILTRATION CAPACITY OF A PERMEABLE PAVEMENT IN THE LABORATORY</b> .....	<b>238</b>
4.1.1	Analysis of the infiltration rates of a permeable pavement in laboratory .....	238
4.1.2	Analysis of a permeable pavement runoff in the laboratory .....	244
<b>4.2</b>	<b>TEST OF PERMEABLE PAVEMENT HYDRAULIC BEHAVIOUR IN THE LABORATORY</b> .....	<b>250</b>
4.2.1	Analysis of the infiltration rates of a permeable pavement .....	250
4.2.2	<i>OASIS®</i> performance zones .....	252

4.2.3	Analysis of the stored volumes in the permeable pavement .....	256
<b>4.3</b>	<b>TESTING OF THE DRAINAGE FUNCTION ASSESSMENT OF POROUS MIXTURES SURFACES OF POROUS CONCRETE AND POROUS ASPHALT IN THE LABORATORY AND THE FIELD.....</b>	<b>259</b>
4.3.1	Laboratory tests.....	259
4.3.2	Field tests.....	262
<b>5.</b>	<b>CONCLUSIONS AND FUTURE RESEARCH.....</b>	<b>267</b>
<b>5.1</b>	<b>CONCLUSIONS .....</b>	<b>267</b>
5.1.1	General conclusions.....	267
5.1.2	Particular conclusions.....	268
5.1.2.1	<i>Literature review.....</i>	<i>268</i>
5.1.2.2	<i>Test of the assessment of the infiltration capacity of a permeable pavement in the laboratory.....</i>	<i>269</i>
5.1.2.3	<i>Test of permeable pavement hydraulic behaviour in the laboratory.....</i>	<i>271</i>
5.1.2.4	<i>Testing of the drainage function assessment of porous mixtures surfaces of porous concrete and porous asphalt in the laboratory and the field.....</i>	<i>272</i>
<b>5.2</b>	<b>FUTURE RESEARCH .....</b>	<b>274</b>
<b>5.3</b>	<b>SCIENTIFIC AND ACADEMIC PRODUCTION OF THIS THESIS.....</b>	<b>276</b>
	<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>279</b>
	<b>ANEXOS.....</b>	<b>295</b>
	<b>ANEXO 1. ENSAYOS DE MEDIDA DE LA CAPACIDAD DE INFILTRACIÓN DE UN PAVIMENTO PERMEABLE EN LABORATORIO.....</b>	<b>297</b>
	<b>Resultados .....</b>	<b>299</b>
	Pavimentos permeables con superficies de adoquines con ranuras.....	299
	Pavimentos permeables con superficies de hormigón poroso reforzado con polímeros.....	323
	Pavimentos permeables con superficies de asfalto poroso.....	347
	Pavimentos permeables con superficies de hormigón poroso reforzado con polímeros (ECOCRETO) .....	371



<b>Análisis de las tasas de infiltración de un pavimento permeable en laboratorio.</b>	
<b>Modelos de regresión.....</b>	<b>382</b>
Pavimentos permeables con superficies de adoquines con ranuras .....	382
Pavimentos permeables con superficies de hormigón poroso reforzado con polímeros .....	391
Pavimentos permeables con superficies de asfalto poroso .....	399
 <b>ANEXO 2. ENSAYOS DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO DE UN FIRME PERMEABLE EN LABORATORIO .....</b>	<b>408</b>
Sección de firme permeable CONTROL .....	410
Sección de firme permeable OASIS 1.3 .....	414
Sección de firme permeable OASIS 2.0 .....	425
 <b>ANEXO 3. ENSAYO DE MEDIDA DE LA DRENABILIDAD DE SUPERFICIES DE HORMIGÓN POROSO Y ASFALTO POROSO .....</b>	<b>437</b>
<b>Ensayos de medida de la drenabilidad en laboratorio .....</b>	<b>439</b>
Superficies de aglomerado poroso de hormigón poroso reforzado con polímeros .....	439
Superficies de aglomerado poroso de asfalto poroso PA-16 .....	441
<b>Ensayos de medida de la drenabilidad en campo .....</b>	<b>443</b>
Plazas de firme permeable con superficies de aglomerado poroso de hormigón poroso reforzado con polímeros.....	443
Plazas de firme permeable con superficies de aglomerado poroso de asfalto poroso PA-12.....	446



## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. ESQUEMA DE LAS PRINCIPALES FILOSOFÍAS DE GESTIÓN DEL AGUA DE LLUVIA EN EL MUNDO Y SUS TÉCNICAS DE GESTIÓN DEL AGUA DE LLUVIA. ....	13
FIGURA 2. SECTORES DE LA ESFERA DE LA VISIÓN INTEGRAL DEL DRENAJE SOSTENIBLE.....	14
FIGURA 3. ESTRUCTURA DE FIRME PERMEABLE PROPUESTA.....	30
FIGURA 4. EVOLUCIÓN DEL NÚMERO DE PUBLICACIONES EN FUNCIÓN DEL AÑO DESDE 1984 HASTA 2014.....	40
FIGURA 5. PORCENTAJE DE PUBLICACIONES RELACIONADAS CON LOS FIRMES PERMEABLES DIVIDIDAS POR PAÍSES. ....	41
FIGURA 6. EVOLUCIÓN DEL NÚMERO DE PUBLICACIONES EN EEUU DESDE 1984 HASTA LA ACTUALIDAD. ....	42
FIGURA 7. EVOLUCIÓN DEL NÚMERO DE PUBLICACIONES SOBRE FIRMES PERMEABLES EN ESPAÑA.....	43
FIGURA 8. INFLUENCIA DE LAS INVESTIGACIONES ESPAÑOLAS EN EL GLOBAL DE LA UNIÓN EUROPEA PARA EL ÁMBITO DE LOS FIRMES PERMEABLES.....	44
FIGURA 9. PORCENTAJE DEL NÚMERO DE PUBLICACIONES ESPAÑOLAS EN EL TOTAL DEL ÁREA DE IBEROAMÉRICA. ....	44
FIGURA 10. SUPERFICIES PERMEABLES (MOSTRADAS EN PORCENTAJE RESPECTO AL TOTAL) UTILIZADAS EN LAS PUBLICACIONES SOBRE FIRMES PERMEABLES ANALIZADAS ENTRE LOS AÑOS 1984 Y 2014. ....	45
FIGURA 11. EVOLUCIÓN DEL NÚMERO DE PUBLICACIONES EN LAS QUE APARECE CADA SUPERFICIE PERMEABLE DESDE 1984 HASTA 2014. ....	46
FIGURA 12. VALORES DE LAS INTENSIDADES REGISTRADAS EN 23 CIUDADES DE TODO EL MUNDO PARA EVENTOS DE LLUVIA DE 15 MINUTOS DE DURACIÓN Y 100 AÑOS DE PERIODO DE RETORNO. ....	51
FIGURA 13. VALORES DE LAS INTENSIDADES REGISTRADAS EN 22 CIUDADES DE TODO EL MUNDO PARA EVENTOS DE LLUVIA DE 15 MINUTOS DE DURACIÓN Y 100 AÑOS DE PERIODO DE RETORNO. ....	52
FIGURA 14. ADOQUÍN RANURADO DE BLOQUES MONSERRAT S.L. (RODRÍGUEZ-HERNANDEZ, 2008). ....	64
FIGURA 15. ESQUEMA DEL NUEVO DISEÑO DEL ICF.....	76
FIGURA 16. TRATAMIENTO ANTIOXIDANTE DE LA ESTRUCTURA METÁLICA DEL ICF Y POSTERIOR PINTADO DE LA MISMA. ....	77
FIGURA 17. RECIPIENTE RECEPTOR ATADO AL BASTIDOR METÁLICO DEL ICF MEDIANTE BRIDAS DE PLÁSTICO (IZQUIERDA) Y DISPOSICIÓN DE LA CINTA AMERICANA A MODO DE SELLADO PERIMETRAL (DERECHA). ....	77
FIGURA 18. MARCO DE MADERA EN EL QUE IRÁN DISPUESTAS LAS PROBETAS DE PAVIMENTO PERMEABLE A ENSAYAR.....	78
FIGURA 19. PERFORACIÓN PRACTICADA EN LA ESTRUCTURA DE METACRILATO PERIMETRAL AL MARCO DE MADERA (IZQUIERDA) Y POSTERIOR FIJACIÓN DEL TUBO PERFORADO MEDIANTE BRIDAS DE PLÁSTICO (DERECHA). ....	78
FIGURA 20. COLOCACIÓN DE LA HILERA DE GOTEROS PARA SIMULAR LA LLUVIA DIRECTA SOBRE LA SUPERFICIE PERMEABLE (IZQUIERDA) Y VISTA GENERAL DE LA APARIENCIA DEL ICF EN ESTE PUNTO DEL PROCESO DE MONTAJE (DERECHA). ....	79
FIGURA 21. DISPOSICIÓN DE LOS CAUDALÍMETROS DE CONTROL DE LOS CAUDALES DE LA ESCORRENTÍA SUPERFICIAL Y DEL AGUA DE LLUVIA DIRECTA. ....	80
FIGURA 22. DISPOSICIÓN DEL GEOTEXTIL EN LA PROBETA DE PAVIMENTO PERMEABLE DEL ICF.....	80
FIGURA 23. DISPOSICIÓN DE LA CAPA DE ÁRIDO CALIZO Y NIVELACIÓN DE LA MISMA. ....	81
FIGURA 24. USO DE LA MAZA SOBRE UNA TABLA PARA PEQUEÑA COMPACTACIÓN Y NIVELACIÓN DE LA CAPA GRANULAR DE BASE. ....	81
FIGURA 25. COLOCACIÓN DE LA SUPERFICIE PERMEABLE Y LIGERA COMPACTACIÓN (IZQUIERDA), Y NIVELACIÓN (DERECHA). ....	82
FIGURA 26. USO DE LA ESPÁTULA PARA ESPARCIR LA MEZCLA DE FORMA HOMOGÉNEA EN EL INTERIOR DEL MOLDE.....	83
FIGURA 27. DETALLE DE LA COLOCACIÓN DEL GEOTEXTIL Y LA CHAPA METÁLICA SOBRE LA PROBETA DE ASFALTO POROSO.....	84
FIGURA 28. COMPACTADO DE LA PROBETA DE ASFALTO POROSO. ....	84
FIGURA 29. (A) APARIENCIA FINAL DE LA PROBETA DE ADOQUINES CON RANURAS, (B) HORMIGÓN POROSO REFORZADO	

CON POLÍMEROS Y (C) LA PROBETA DE ASFALTO POROSO, DISPUESTAS EN EL ICF Y PREPARADAS PARA SER ENSAYADAS. ....	85
FIGURA 30. ESCENARIOS DE COLMATACIÓN. (A) SUPERFICIE PERMEABLE RECIÉN CONSTRUIDA, (B) SUPERFICIE PERMEABLE COLMATADA, Y (C) SUPERFICIE PERMEABLE COLMATADA CON MANTENIMIENTO (ABAJO).....	87
FIGURA 31. ESQUEMA EXPLICATIVO DE LAS VARIABLES QUE INTERVIENEN EN EL ENSAYO. ....	90
FIGURA 32. DETALLE DE LAS SUPERFICIES PERMEABLES ENSAYADAS EN EL ICF. ADOQUINES IMPERMEABLES EN DISPOSICIÓN PERMEABLE (IZQUIERDA), HORMIGÓN POROSO REFORZADO CON POLÍMEROS (CENTRO) Y ASFALTO POROSO (DERECHA).....	91
FIGURA 33. ENSAYO DE PERMEABILIDAD AL AGUA PERPENDICULARMENTE AL PLANO SIN CARGA SEGÚN UNE-EN ISO 11058:2010 (IZQUIERDA) Y ENSAYO DE LA MASA POR UNIDAD DE SUPERFICIE SEGÚN UNE-EN ISO 9864 (2005) (DERECHA).....	93
FIGURA 34. GRANULOMETRÍA DE LOS SEDIMENTOS UTILIZADOS PARA COLMATAR LA SUPERFICIE DE ADOQUINES Y LAS SUPERFICIES DE AGLOMERADO POROSO (HORMIGÓN Y ASFALTO POROSO). ....	94
FIGURA 35. (A) PREPARACIÓN DE LOS SEDIMENTOS CON LOS TAMICES UNE Y (B) LAS BANDEJAS PARA DIVIDIR LOS DISTINTOS TAMAÑOS DE SEDIMENTO, Y (C) PESADO DE BANDEJA CON LA MEZCLA FINAL DE SEDIMENTO.....	96
FIGURA 36. EXTENDIDO DEL SEDIMENTO SOBRE LA SUPERFICIE PERMEABLE. EN EL CASO DE ESTA FIGURA LA SUPERFICIE PERMEABLE FUE LA DE ADOQUINES IMPERMEABLES CON RANURAS. ....	97
FIGURA 37. CEPILLO DE CERDAS DURAS PARA LA SIMULACIÓN DE LAS LABORES DE MANTENIMIENTO SOBRE UNA SUPERFICIE PERMEABLE. ....	98
FIGURA 38. PARTES DEL SIMULADOR DE LLUVIA PLR.....	99
FIGURA 39. GOTERO NO AJUSTABLE UTILIZADO INICIALMENTE EN EL SIMULADOR DE LLUVIA PLR. ....	100
FIGURA 40. PROBLEMAS DE OBTURACIÓN DETECTADOS EN LOS GOTEROS NO AJUSTABLES. ....	101
FIGURA 41. CONFIGURACIÓN FINAL DEL SIMULADOR DE LLUVIA PLR CON LOS GOTEROS AJUSTABLES. ....	101
FIGURA 42. PROBETA (IZQUIERDA) PARA LA MEDIDA DEL VOLUMEN DE AGUA SIMULADO MEDIANTE EL PLR (DERECHA).....	102
FIGURA 43. CALIBRACIONES REALIZADAS SOBRE EL SIMULADOR PLR PARA EVENTOS DE LLUVIA DE DURACIÓN 1 Y 5 MINUTOS, RESPECTIVAMENTE. ....	102
FIGURA 44. CONTENEDOR UTILIZADO PARA ALBERGAR LA SECCIÓN DEL FIRME PERMEABLE CON UN TUBO DE PLÁSTICO DISPUESTO EN LA PARTE INFERIOR DEL MISMO Y ESQUEMA DE LOS 9 CONTENEDORES UTILIZADOS EN LOS ENSAYOS. ....	104
FIGURA 45. ÁRIDO DE SUB-BASE COLOCADO EN EL INTERIOR DEL CONTENEDOR. ....	105
FIGURA 46. DETALLE DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL DE LA CAPA DE SEPARACIÓN Y FILTRACIÓN CONFORMADA POR EL OASIS®. ....	105
FIGURA 47. CAPA DE ÁRIDO DE BASE DE TAMAÑO 4 - 6,3 MM. ....	106
FIGURA 48. ADOQUINES IMPERMEABLES DE HORMIGÓN EN DISPOSICIÓN PERMEABLE UTILIZADOS COMO CAPA DE SUPERFICIE PERMEABLE. ....	106
FIGURA 49. PROBETA GRADUADA PARA LA MEDIDA DEL CAUDAL INFILTRADO POR TODA LA SECCIÓN DEL FIRME PERMEABLE. ....	107
FIGURA 50. PERMEÁMETRO DEL LABORATORIO CAMINOS SANTANDER (LCS).....	111
FIGURA 51. ZONAS PRINCIPALES DE MEDIDA CON EL LCS EN LABORATORIO EN LAS PROBETAS DE SUPERFICIES PERMEABLE DE AGLOMERADO POROSO UTILIZADAS EN EL ICF (IZQUIERDA) Y DETALLE DE LOS SEDIMENTOS ATRAPADOS EN LAS SUPERFICIES. ....	113
FIGURA 52. IMAGEN DE LAS DOS HILERAS DE PLAZAS DE APARCAMIENTO ENSAYADAS CON EL LCS. HORMIGÓN POROSO	

REFORZADO CON POLÍMEROS (MARGEN IZQUIERDA DE LA IMAGEN SUPERIOR) Y ASFALTO POROSO (MARGEN DERECHA DE LA IMAGEN SUPERIOR).....	114
FIGURA 53. ZONAS DE ESTUDIO EN CADA PLAZA DE APARCAMIENTO. ....	115
FIGURA 54. REPRESENTACIÓN EN 3D DEL MODELO DE REGRESIÓN LINEAL OBTENIDO PARA UN PAVIMENTO DE SUPERFICIE DE ADOQUINES IMPERMEABLES DE HORMIGÓN EN DISPOSICIÓN PERMEABLE RECIÉN CONSTRUIDO. ....	125
FIGURA 55. REPRESENTACIÓN EN 3D DEL MODELO DE REGRESIÓN LINEAL OBTENIDO PARA UN PAVIMENTO DE SUPERFICIE DE ADOQUINES IMPERMEABLES DE HORMIGÓN EN DISPOSICIÓN PERMEABLE COLMATADO. ....	126
FIGURA 56. REPRESENTACIÓN EN 3D DEL MODELO DE REGRESIÓN LINEAL OBTENIDO EN LA TABLA 25 PARA UN PAVIMENTO DE SUPERFICIE PERMEABLE DE HORMIGÓN POROSO REFORZADO CON POLÍMEROS RECIÉN CONSTRUIDO. ....	130
FIGURA 57. REPRESENTACIÓN EN 3D DEL MODELO DE REGRESIÓN LINEAL OBTENIDO EN LA TABLA 25 PARA UN PAVIMENTO DE SUPERFICIE PERMEABLE DE HORMIGÓN. ....	130
FIGURA 58. REPRESENTACIÓN EN 3D DEL MODELO DE REGRESIÓN LINEAL OBTENIDO EN LA TABLA 22 PARA UN PAVIMENTO DE SUPERFICIE PERMEABLE DE ASFALTO POROSO RECIÉN CONSTRUIDO. ....	135
FIGURA 59. REPRESENTACIÓN EN 3D DEL MODELO DE REGRESIÓN LINEAL OBTENIDO EN LA TABLA 22 PARA UN PAVIMENTO DE SUPERFICIE PERMEABLE DE ASFALTO POROSO COLMATADO.....	135
FIGURA 60. VALOR DE LA ESCORRENTÍA SUPERFICIAL RESIDUAL (%) EN FUNCIÓN DEL ESCENARIO DE COLMATACIÓN Y LA PENDIENTE DE LA SUPERFICIE PERMEABLE PARA UN PAVIMENTO PERMEABLE EJECUTADO MEDIANTE UNA SUPERFICIE DE ADOQUINES. ....	140
FIGURA 61. TENDENCIA DE LA ESCORRENTÍA SUPERFICIAL RESIDUAL EN FUNCIÓN DE LA PENDIENTE DE LA SUPERFICIE PERMEABLE PARA LOS TRES ESCENARIOS DE COLMATACIÓN ANALIZADOS PARA UNA SUPERFICIE DE ADOQUINES IMPERMEABLES DE HORMIGÓN EN DISPOSICIÓN PERMEABLE.....	141
FIGURA 62. VALOR DE LA ESCORRENTÍA SUPERFICIAL RESIDUAL (%) EN FUNCIÓN DEL ESCENARIO DE COLMATACIÓN Y LA PENDIENTE DE LA SUPERFICIE PERMEABLE PARA UN PAVIMENTO PERMEABLE EJECUTADO MEDIANTE UNA SUPERFICIE DE HORMIGÓN POROSO REFORZADO CON POLÍMEROS.....	143
FIGURA 63. TENDENCIA DE LA ESCORRENTÍA SUPERFICIAL RESIDUAL EN FUNCIÓN DE LA PENDIENTE DE LA SUPERFICIE PERMEABLE PARA LOS TRES ESCENARIOS DE COLMATACIÓN ANALIZADOS PARA UNA SUPERFICIE DE HORMIGÓN POROSO REFORZADO CON POLÍMEROS. ....	144
FIGURA 64. VALOR DE LA ESCORRENTÍA SUPERFICIAL RESIDUAL (%) EN FUNCIÓN DEL ESCENARIO DE COLMATACIÓN Y LA PENDIENTE DE LA SUPERFICIE PERMEABLE PARA UN PAVIMENTO PERMEABLE EJECUTADO MEDIANTE UNA SUPERFICIE DE ASFALTO POROSO PA-16. ....	146
FIGURA 65. TENDENCIA DE LA ESCORRENTÍA SUPERFICIAL RESIDUAL EN FUNCIÓN DE LA PENDIENTE DE LA SUPERFICIE PERMEABLE PARA LOS TRES ESCENARIOS DE COLMATACIÓN ANALIZADOS PARA UNA SUPERFICIE DE ASFALTO POROSO PA-16. ....	147
FIGURA 66. DETALLE DE LOS SEDIMENTOS QUE HAN INFILTRADO HACIA EL GEOTEXTIL. ....	150
FIGURA 67. HIDROGRAMA DE DESCARGA DE LA SECCIÓN CONTROL REPRESENTADO MEDIANTE LAS TASAS DE INFILTRACIÓN PARA INTENSIDADES DE LLUVIA DE 100, 200 Y 400 MM/H.....	152
FIGURA 68. VOLUMEN MEDIO DE AGUA SALIENTE POR EL TUBO DE PLÁSTICO INFERIOR EN LAS SECCIONES DE FIRME PERMEABLE CONTROL.....	153
FIGURA 69. HIDROGRAMA DE DESCARGA DE LA SECCIÓN OASIS 1.3 REPRESENTADO MEDIANTE LAS TASAS DE INFILTRACIÓN PARA INTENSIDADES DE LLUVIA DE 100, 200 Y 400 MM/H.....	154
FIGURA 70. HIDROGRAMA DE DESCARGA DE LA SECCIÓN OASIS 2.0 REPRESENTADO MEDIANTE LAS TASAS DE INFILTRACIÓN PARA INTENSIDADES DE LLUVIA DE 100, 200 Y 400 MM/H.....	156

FIGURA 71. TIEMPO MEDIO QUE NECESITÓ CADA SECCIÓN DE FIRME PERMEABLE PARA LA APARICIÓN DEL CAUDAL EFLUENTE CON LAS INTENSIDADES DE LLUVIA ENSAYADAS EN ESTE ESTUDIO. ....	159
FIGURA 72. TIEMPO NECESARIO PARA ALCANZAR EL CAUDAL PUNTA DEBIDO A CADA INTENSIDAD DE LLUVIA EN FUNCIÓN DE LA SECCIÓN DE FIRME PERMEABLE DESDE EL COMIENZO DE LA APARICIÓN DEL CAUDAL SALIENTE. ....	161
FIGURA 73. ESQUEMA DE LAS ZONAS DE FUNCIONAMIENTO DE LAS SECCIONES DE FIRME PERMEABLE CON CAPAS DE OASIS®. ....	164
FIGURA 74. VOLUMEN MEDIO ALMACENADO EN EL OASIS® EN FUNCIÓN DE SU ESPESOR, COMPARANDO EL VOLUMEN ALMACENADO EN LA ZONA A (COLUMNA IZQUIERDA) Y EL VOLUMEN TOTAL ALMACENADO ENTRE LAS ZONAS A Y B (COLUMNA DERECHA). ....	166
FIGURA 75. VALORES DE LA PERMEABILIDAD REGISTRADOS EN LAS SUPERFICIES DE ASFALTO POROSO (PA) Y HORMIGÓN POROSO REFORZADO CON POLÍMEROS (PMPC) EN EL APARCAMIENTO EXPERIMENTAL MEDIANTE EL USO DEL LCS. ....	175
FIGURA 76. VALORES DE LA REDUCCIÓN DE LA CAPACIDAD DE INFILTRACIÓN EN LA SUPERFICIE DE ASFALTO POROSO (PA) Y DE HORMIGÓN POROSO REFORZADO CON POLÍMEROS (PMPC). ....	176
FIGURA 77. ESQUEMA DEL ANÁLISIS ESTADÍSTICO SEGUIDO EN FUNCIÓN DEL CUMPLIMIENTO O NO DE LA NORMALIDAD POR PARTE DE LAS VARIABLES DEPENDIENTES PERMEABILIDAD Y REDUCCIÓN DE LA CAPACIDAD DE INFILTRACIÓN, TENIENDO EN CUENTA QUE LAS MUESTRAS SON INDEPENDIENTES. ....	177

## ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. CLASIFICACIÓN PROPUESTA PARA UN FIRME PERMEABLE SEGÚN EL TIPO DE PAVIMENTO PERMEABLE EMPLEADO, SEGÚN EL MATERIAL UTILIZADO EN LA SUB-BASE Y SEGÚN EL DESTINO FINAL DEL AGUA INFILTRADA A TRAVÉS DE SU ESTRUCTURA. ....	33
TABLA 2. INSTRUMENTOS UTILIZADOS EN LAS INVESTIGACIONES LLEVADAS A CABO EN LAS ÚLTIMAS DÉCADAS SOBRE DISTINTAS SUPERFICIES PERMEABLES. ....	57
TABLA 3. DOSIFICACIÓN POR M <sup>3</sup> DEL HORMIGÓN POROSO REFORZADO CON POLÍMEROS PINDADO ET AL. (1999). ....	66
TABLA 4. DOSIFICACIÓN POR M <sup>3</sup> DEL HORMIGÓN POROSO EJECUTADO MEDIANTE EL USO DEL ADITIVO ECOCRETO (ECOCRETO 2011). ....	66
TABLA 5. GRANULOMETRÍA DEL ÁRIDO UTILIZADO PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA MEZCLA BITUMINOSA DRENANTE PA-16 (MINISTERIO DE FOMENTO. DIRECCIÓN GENERAL DE CARRETERAS 2011). ....	67
TABLA 6. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL GEOTEXTIL DANOFELT PY 150 (DANOSA, 2013). ....	68
TABLA 7. GRANULOMETRÍA DEL ÁRIDO CALIZO UTILIZADO COMO SUB-BASE DE FIRMES PERMEABLES CUMPLIENDO CON LOS RANGOS DE CERNIDO ACUMULADO ESTABLECIDOS EN EL PG-3 PARA UNA ZAD-20 (BUSTOS AND PÉREZ 2007). ....	69
TABLA 8. CARACTERÍSTICAS DE LAS SECCIONES DE FIRME PERMEABLE ANALIZADAS MEDIANTE EL PERMEÁMETRO LCS EN EL APARCAMIENTO EXPERIMENTAL DEL PARQUE DE “LAS LLAMAS” EN SANTANDER (GÓMEZ-ULLATE 2011). ....	70
TABLA 9. MASAS DE LAS DISTINTAS PROBETAS DE HORMIGÓN POROSO REFORZADO CON POLÍMEROS FABRICADAS PARA EL ICF. ....	82
TABLA 10. MASA, DENSIDAD APARENTE Y PORCENTAJE DE HUECOS DE LAS DISTINTAS PROBETAS DE ASFALTO POROSO. ....	85
TABLA 11. SECCIONES UTILIZADAS EN LA INVESTIGACIÓN. ....	103
TABLA 12. TABLA DE CALIFICACIONES PARA UNA SUPERFICIE PERMEABLE DE AGLOMERADO POROSO EN FUNCIÓN DEL TIEMPO DE MEDIDA DEL ENSAYO REALIZADO CON EL PERMEÁMETRO LCS. ....	115
TABLA 13. COEFICIENTES DE CORRELACIÓN BIVARIADOS OBTENIDOS MEDIANTE EL ANÁLISIS CON LA RHO DE SPEARMAN. ....	120
TABLA 14. COEFICIENTES DE CORRELACIÓN BIVARIADOS OBTENIDOS MEDIANTE EL ANÁLISIS CON LA RHO DE SPEARMAN PARA LA SUPERFICIE PERMEABLE DE ADOQUINES IMPERMEABLES CON RANURAS. ....	121
TABLA 15. COEFICIENTES DE CORRELACIÓN BIVARIADOS OBTENIDOS MEDIANTE EL ANÁLISIS CON LA RHO DE SPEARMAN PARA LA SUPERFICIE PERMEABLE DE HORMIGÓN POROSO. ....	122
TABLA 16. COEFICIENTES DE CORRELACIÓN BIVARIADOS OBTENIDOS MEDIANTE EL ANÁLISIS CON LA RHO DE SPEARMAN PARA LA SUPERFICIE PERMEABLE DE ASFALTO POROSO PA-16. ....	123
TABLA 17. MODELOS DE REGRESIÓN LINEAL OBTENIDOS PARA EL PAVIMENTO PERMEABLE CON SUPERFICIE DE ADOQUINES IMPERMEABLES CON RANURAS CON UN NIVEL DE CONFIANZA DEL 95%, Y VALORES DE LA T DE STUDENT. ....	124
TABLA 18. RANGO DE VALIDEZ DEL MODELO DE REGRESIÓN LINEAL DE LA SUPERFICIE DE ADOQUINES IMPERMEABLES CON RANURAS PARA EL ESCENARIO DE SUPERFICIE RECIÉN CONSTRUIDA. ....	127
TABLA 19. MODELOS DE REGRESIÓN LINEAL OBTENIDOS PARA EL PAVIMENTO PERMEABLE CON SUPERFICIE DE HORMIGÓN POROSO CON UN NIVEL DE CONFIANZA DEL 95%, Y VALORES DE LA T DE STUDENT. ....	128
TABLA 20. RANGO DE VALIDEZ DEL MODELO DE REGRESIÓN LINEAL DE LA SUPERFICIE DE HORMIGÓN POROSO REFORZADO CON POLÍMEROS PARA EL ESCENARIO DE SUPERFICIE RECIÉN CONSTRUIDA. ....	131
TABLA 21. RANGO DE VALIDEZ DEL MODELO DE REGRESIÓN LINEAL DE LA SUPERFICIE DE HORMIGÓN POROSO REFORZADO CON POLÍMEROS PARA EL ESCENARIO DE SUPERFICIE COLMATADA. ....	132
TABLA 22. MODELOS DE REGRESIÓN LINEAL OBTENIDOS PARA EL PAVIMENTO PERMEABLE CON SUPERFICIE DE ASFALTO POROSO PA-16 CON UN NIVEL DE CONFIANZA DEL 95%, Y VALORES DE LA T DE STUDENT. ....	133

TABLA 23. RANGO DE VALIDEZ DEL MODELO DE REGRESIÓN LINEAL DE LA SUPERFICIE DE ASFALTO POROSO PARA EL ESCENARIO DE SUPERFICIE RECÍEN CONSTRUÍDA. ....	136
TABLA 24. RANGO DE VALIDEZ DEL MODELO DE REGRESIÓN LINEAL DE LA SUPERFICIE DE ASFALTO POROSO PARA EL ESCENARIO DE SUPERFICIE COLMATADA. ....	137
TABLA 25. COEFICIENTES DE CORRELACIÓN BIVARIADOS OBTENIDOS MEDIANTE EL ANÁLISIS CON LA RHO DE SPEARMAN. ....	138
TABLA 26. COEFICIENTES DE CORRELACIÓN BIVARIADOS OBTENIDOS MEDIANTE EL ANÁLISIS CON LA RHO DE SPEARMAN PARA LA SUPERFICIE DE ADOQUINES CON RANURAS. ....	139
TABLA 27. COEFICIENTES DE CORRELACIÓN BIVARIADOS OBTENIDOS MEDIANTE EL ANÁLISIS CON LA RHO DE SPEARMAN PARA LA SUPERFICIE DE HORMIGÓN POROSO REFORZADO CON POLÍMEROS. ....	142
TABLA 28. COEFICIENTES DE CORRELACIÓN BIVARIADOS OBTENIDOS MEDIANTE EL ANÁLISIS CON LA RHO DE SPEARMAN PARA LA SUPERFICIE DE ASFALTO POROSO PA-16. ....	145
TABLA 29. COEFICIENTES DE CORRELACIÓN BIVARIADOS OBTENIDOS MEDIANTE EL ANÁLISIS CON LA RHO DE SPEARMAN PARA LAS SUPERFICIES DE AGLOMERADO POROSO DE HORMIGÓN POROSO REFORZADO CON POLÍMEROS Y ASFALTO POROSO. ....	148
TABLA 30. RESULTADO DE LOS ENSAYOS DE PERMEABILIDAD AL AGUA PERPENDICULARMENTE AL PLANO SIN CARGA SEGÚN UNE-EN ISO 11058:2010 Y ENSAYO DE LA MASA POR UNIDAD DE SUPERFICIE SEGÚN UNE-EN ISO 9864 (2005). ....	149
TABLA 31. VALORES DEL TIEMPO MEDIDO DESDE EL COMIENZO DEL ENSAYO PARA LA APARICIÓN DEL CAUDAL SALIENTE, Y VALORES DEL VOLUMEN DE AGUA ATENUADO PARA EL CASO HIPOTÉTICO DE UN APARCAMIENTO PERMEABLE. ....	160
TABLA 32. VALORES DEL TIEMPO MEDIDO DESDE EL COMIENZO DEL ENSAYO PARA ALCANZAR EL CAUDAL PUNTA O FASE ESTACIONARIA, Y VALORES DEL VOLUMEN DE AGUA CORRESPONDIENTE PARA EL CASO HIPOTÉTICO DE UN APARCAMIENTO PERMEABLE. ....	162
TABLA 33. VOLUMEN MEDIO DE AGUA ALMACENADO DENTRO DE CADA CAPA DE OASIS® EN LA ZONA A DE FUNCIONAMIENTO EN FUNCIÓN DE LA INTENSIDAD DE LLUVIA EN LOS ENSAYOS DE LABORATORIO. ....	165
TABLA 34. VOLUMEN MEDIO DE AGUA ALMACENADO EN TOTAL (ZONAS A Y B) DENTRO DE CADA CAPA DE OASIS® EN FUNCIÓN DE LA INTENSIDAD DE LLUVIA EN LOS ENSAYOS DE LABORATORIO. ....	166
TABLA 35. VALORES DE LA PERMEABILIDAD DE LAS PROBETAS DE HORMIGÓN POROSO REFORZADO CON POLÍMEROS OBTENIDOS MEDIANTE EL USO DEL PERMEÁMETRO LCS. ....	168
TABLA 36. VALORES DE LA PERMEABILIDAD DE LAS PROBETAS DE ASFALTO POROSO PA-16 OBTENIDOS MEDIANTE EL USO DEL PERMEÁMETRO LCS. ....	169
TABLA 37. RESULTADOS DE PERMEABILIDAD Y PÉRDIDA DE LA CAPACIDAD DE INFILTRACIÓN EN LAS PROBETAS DE HORMIGÓN POROSO. ....	170
TABLA 38. RESULTADOS DE PERMEABILIDAD Y PÉRDIDA DE LA CAPACIDAD DE INFILTRACIÓN EN LAS PROBETAS DE ASFALTO POROSO. ....	171
TABLA 39. VALORES PROMEDIO DE LA PERMEABILIDAD MEDIA Y DE LA REDUCCIÓN DE LA CAPACIDAD DE INFILTRACIÓN EN CADA ZONA DE ESTUDIO DE LAS PLAZAS DE APARCAMIENTO EJECUTADAS CON SUPERFICIES PERMEABLES DE HORMIGÓN POROSO Y CALIFICACIÓN DE SU COMPORTAMIENTO EN PERMEABILIDAD. ....	173
TABLA 40. VALORES PROMEDIO DE LA PERMEABILIDAD MEDIA Y DE LA REDUCCIÓN DE LA CAPACIDAD DE INFILTRACIÓN EN CADA ZONA DE ESTUDIO DE LAS PLAZAS DE APARCAMIENTO EJECUTADAS CON SUPERFICIES PERMEABLES DE ASFALTO POROSO Y CALIFICACIÓN DE SU COMPORTAMIENTO EN PERMEABILIDAD. ....	174
TABLA 41. VALORES DEL COEFICIENTE RHO DE SPEARMAN PARA EL ANÁLISIS DE LA CORRELACIÓN BIVARIADA ENTRE LOS VALORES DE LA PERMEABILIDAD OBTENIDOS MEDIANTE EL LCS CON EL TIPO DE SUPERFICIE PERMEABLE DE	



AGLOMERADO POROSO Y CON LA ZONA DE MEDIDA. ....	178
TABLA 42. VALORES DEL COEFICIENTE RHO DE SPEARMAN PARA EL ANÁLISIS DE LA CORRELACIÓN BIVARIADA ENTRE LOS VALORES DE LA REDUCCIÓN DE LA CAPACIDAD DE INFILTRACIÓN CON EL TIPO DE SUPERFICIE PERMEABLE DE AGLOMERADO POROSO Y CON LA ZONA DE MEDIDA. ....	179
TABLA 43. VALORES DE LOS COEFICIENTES DE LA RHO DE SPEARMAN PARA EL ANÁLISIS DE LA CORRELACIÓN BIVARIADA ENTRE LAS ZONAS DE MEDIDA DE CADA PLAZA DE APARCAMIENTO EN FUNCIÓN DEL TIPO DE SUPERFICIE DE AGLOMERADO POROSO CON LOS VALORES DE LA PERMEABILIDAD Y CON LA REDUCCIÓN DE LA CAPACIDAD DE INFILTRACIÓN.....	179
TABLA 44. TEST DE SIGNIFICANCIA DE MANN-WHITNEY Y DE KRUSKAL WALLIS PARA LAS VARIABLES PERMEABILIDAD Y REDUCCIÓN DE LA CAPACIDAD DE INFILTRACIÓN EN FUNCIÓN DEL TIPO DE SUPERFICIE DE AGLOMERADO POROSO.....	181
TABLA 45. TEST DE SIGNIFICANCIA DE ANOVA DE UN FACTOR Y KRUSKAL WALLIS PARA LAS VARIABLES PERMEABILIDAD Y REDUCCIÓN DE LA CAPACIDAD DE INFILTRACIÓN DE UNA SUPERFICIE EN FUNCIÓN DE LAS ZONAS DENTRO DE LA PLAZA DE APARCAMIENTO. ....	182



## **CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES**



## 1.1 MARCO Y JUSTIFICACIÓN DE LA TESIS

La evolución de las ciudades ha hecho que el desarrollo sostenible se haya convertido en una necesidad, y dentro de ella la construcción urbana sostenible.

El Grupo de Investigación de Tecnología de la Construcción (GITECO) de la Universidad de Cantabria ha venido desarrollando una buena parte de su trabajo en esta área. Por ello, creó en el año 2003 la línea de investigación denominada “Construcción de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS)”, con la colaboración de la Universidad de Coventry, Reino Unido.

En dicha línea de investigación se enmarcan 4 proyectos de investigación competitivos financiados por el Gobierno de España desde el 2003 hasta el 2015 con cargo al Presupuesto General del Estado (PGE) y a los Fondos Europeos para el Desarrollo Regional (FEDER):

- “Desarrollo de nuevas estructuras de firmes filtrantes biodegradantes de hidrocarburos (FIDICA)” con referencia REN2003-05278/TECNO.
- “Desarrollo de nuevos sistemas de captación, pretratamiento y tratamiento in situ, de aguas contaminadas con hidrocarburos procedentes de la escorrentía urbana en aparcamientos con firmes impermeables (TRAPI)” con referencia CTM2006-00310.
- “Desarrollo de sistemas de captación y almacenamiento de agua de lluvia, mediante firmes filtrantes en aparcamientos, para usos no potables y como aprovechamiento de energía geotérmica de baja entalpía (VEA)” con referencia BIA2009-08272.
- “Rehabilitación Hidrológica de Infraestructuras Viales Urbanas (RHIVU)” con referencia BIA2012-32463.

Fruto de la continua actividad investigadora del grupo en esta línea de trabajo, 4 tesis doctorales han sido defendidas con éxito, obteniéndose en todos los casos la máxima calificación de Sobresaliente cum laude:

- "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". Rodríguez-Hernández, J. (2008).

- "Análisis de los aspectos de depuración y degradación de los hidrocarburos presentes en las aguas procedentes de la escorrentía urbana, en los firmes permeables". Rodríguez-Bayón, J. (2008).
- "Desarrollo de un sistema de captación, pretratamiento y tratamiento in situ, de aguas contaminadas con hidrocarburos procedentes de la escorrentía urbana en aparcamientos con firmes impermeables". Fernández-Barrera, A.H. (2010).
- "Estudio de un aparcamiento de firmes filtrantes para la mejora de la gestión sostenible de las aguas urbanas mediante el almacenamiento y valorización del agua de lluvia". Gómez-Ullate, M.E. (2011).

Como parte del trabajo realizado durante estos 10 años en el GITECO-UC se ha dotado a la Universidad de Cantabria del Laboratorio de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDSlab). Esta instalación ha sido posible gracias a la financiación asociada a los cuatro proyectos del Plan Nacional anteriormente mencionados y representa la primera instalación de estas características en España.

Con todo, esta tesis, la quinta de la línea de investigación, se enmarca dentro del tercer proyecto del Plan Nacional, citado anteriormente: "Desarrollo de sistemas de captación y almacenamiento de agua de lluvia, mediante firmes filtrantes en aparcamientos, para usos no potables y como aprovechamiento de energía geotérmica de baja entalpía (VEA)", con referencia BIA2009-08272; centrándose en el análisis de la infiltración de agua de lluvia en firmes permeables con superficies de adoquines, hormigón poroso y asfalto poroso para el control en origen de inundaciones.

Por último, es de destacar que el autor de la tesis logró la concesión de la primera Beca para la Formación del Personal Investigador (FPI) del grupo GITECO, asociada al citado proyecto y concedida por el Ministerio de Economía y Competitividad del Gobierno de España. Esta beca, con referencia BES-2010-030064, ha financiado la actividad investigadora del autor, incluida su estancia pre-doctoral en la Universidad de Coventry. Dicha estancia pre-doctoral permite al candidato optar a la mención de "Doctor Internacional" del Espacio Europeo de Educación Superior (EEES).

## 1.2 OBJETIVOS E HIPÓTESIS

Los objetivos fundamentales del proyecto “Desarrollo de sistemas de captación y almacenamiento de agua de lluvia, mediante firmes filtrantes en aparcamientos, para usos no potables y como aprovechamiento de energía geotérmica de baja entalpía (VEA)”, con referencia BIA2009-08272, dentro del cual está enmarcada esta tesis, fueron los siguientes:

1. Estudio y optimización de los métodos de captación de agua de lluvia a través de pavimentos filtrantes, basándose en la utilización de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS).
2. Evaluación de la cantidad y calidad del agua de lluvia almacenada en la sub-base del firme, para su empleo posterior con fines no potables urbanos (riego de parques y jardines, baldeo de calles), recreativos (riego de campos de golf, estanques) y ambientales (recarga de acuíferos, extinción de incendios).
3. Investigación y desarrollo de sistemas de almacenamiento de agua de lluvia en firmes permeables como medio de aprovechamiento de energía geotérmica de baja entalpía.
4. Desarrollo de un sistema integral que aúne captación y almacenamiento de agua de lluvia, en cantidad y calidad suficiente para su empleo en usos no potables y como medio de aprovechamiento de la energía geotérmica de baja entalpía mediante bomba de calor.

La presente tesis se marcó como objetivo fundamental dar cumplimiento al primer objetivo del proyecto, y a parte del segundo, llevando a cabo un detallado estudio de la infiltración del agua de lluvia a través de los firmes permeables, considerados como sistemas de captación del agua de lluvia para el control en origen de la escorrentía urbana, con el fin último de ayudar a evitar inundaciones en el entorno urbano de una forma sostenible.

Para el correcto desarrollo de la investigación, se establecieron los siguientes objetivos particulares:

1. Estudio de los firmes permeables más utilizados a nivel mundial como técnicas de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) y selección de diferentes superficies permeables y materiales susceptibles de ser

utilizados en un firme permeable para su estudio en cuanto a su capacidad de infiltración.

2. Desarrollo y validación de una metodología de laboratorio para el análisis de la escorrentía de superficies permeables.
3. Desarrollo y validación de una metodología de laboratorio de análisis de la capacidad de infiltración de pavimentos permeables.
4. Desarrollo de una metodología de laboratorio para el análisis de la funcionalidad hidráulica de un firme permeable, y validación de la misma mediante el estudio de una nueva capa de separación entre la base y la sub-base de un firme permeable.
5. Desarrollo de una metodología de campo para el diagnóstico hidráulico tras años de utilización de firmes permeables con superficies porosas.
6. Los vehículos aparcados sobre una plaza ejecutada con firme permeable influyen en la capacidad de infiltración del mismo.

Las hipótesis que se plantean como punto de partida de esta tesis doctoral son las siguientes:

1. Distintas superficies permeables, bajo distintas condiciones, muestran comportamientos distintos que permiten su caracterización hidráulica.
2. La capacidad de infiltración de un pavimento permeable se ve afectada por varias variables distintas del estado de colmatación.
3. Existen posibilidades de mejora de la capacidad de laminación y control de inundaciones mediante firmes permeables.
4. Es posible diagnosticar de forma inequívoca el estado de colmatación de un firme permeable en un momento determinado del tiempo.
5. Las gotas de lluvia pueden influir sobre la permeabilidad de una superficie de aglomerado poroso colmatada.



### 1.3 ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO

Para la exposición documental del trabajo que constituye esta tesis doctoral se ha optado por la estructura clásica asociada a la investigación científica: justificación, estudio del estado del arte, metodología, discusión de resultados y conclusiones. Por tanto, este documento de tesis doctoral está estructurado en 5 capítulos fundamentales:

- En el capítulo 1 de la tesis se detallan los antecedentes, los objetivos y las hipótesis de la presente investigación, además de la estructura que vertebra este documento. Además, se realizará una pequeña introducción a los Sistemas de Drenaje Sostenible.
- El capítulo 2 corresponde al estudio del estado del arte específico de los firmes permeables como un Sistema de Drenaje Sostenible, analizando en detalle las investigaciones previas sobre su capacidad de infiltración y su aplicación como técnica de drenaje en aparcamientos para tráfico ligero.
- En el capítulo 3 se describen detalladamente todas las metodologías desarrolladas y empleadas en esta tesis doctoral, con especial detalle de los materiales y equipos utilizados, sus diseños, construcción y funcionamiento.
- El capítulo 4 recoge los resultados obtenidos en cada ensayo realizado siguiendo las metodologías descritas, así como el análisis y la discusión de los mismos, tanto a nivel descriptivo como estadístico.
- Por último, en el capítulo 5 se presentan las principales conclusiones obtenidas una vez discutidos los resultados, acompañadas de las futuras líneas de investigación propuestas como continuación del trabajo desarrollado.

A continuación de estos capítulos, se presenta un resumen extendido de la tesis doctoral escrito en inglés, con el objetivo de cumplir con uno de los requisitos para la obtención de la mención de “Doctor Internacional”.

Para finalizar este documento, se incluye el listado completo de las referencias bibliográficas utilizadas en esta investigación, seguido de los anexos que contienen datos más detallados sobre algunos de los puntos de esta tesis.

## **1.4 INTRODUCCIÓN AL DRENAJE SOSTENIBLE**

### **1.4.1 PROBLEMAS ASOCIADOS A LA GESTIÓN DEL AGUA DE LLUVIA EN LAS CIUDADES**

El rápido crecimiento urbano de las últimas décadas ha derivado en un aumento muy importante de la población en las ciudades actuales (Dauphiné and Provitolo 2007) y en una impermeabilización masiva del suelo natural, debida a su creciente ocupación de superficie (Dietz 2007; Wright et al. 2011). Este hecho unido al cambio climático ha derivado en graves problemas de inundaciones en ciudades de todo el mundo (Swan 2010). Este intenso crecimiento urbano (Eigenbrod et al. 2011), asociado al traslado de la población mundial hacia las ciudades, ha sido cuantificado por la Organización de las Naciones Unidas (ONU). Según la ONU, entre un 13% y un 50% de la población mundial se ha trasladado a las ciudades de todo el mundo durante las últimas décadas del siglo XX y la primera del siglo XXI. Las perspectivas futuras de crecimiento no presentan un panorama de estancamiento del mismo, sino por el contrario, muestran una clara tendencia hacia un aumento, llegando a alcanzar entre un 70% y un 86% en el año 2050, siendo las sociedades desarrolladas las que muestran los mayores valores (United Nations 2011).

Estas tendencias de crecimiento junto a la creciente modificación en los usos del suelo natural, debido a la rápida urbanización en las últimas décadas (Eigenbrod et al. 2011), contribuyen a interrumpir el ciclo natural del agua, incrementando los caudales punta de escorrentía superficial debidos a la lluvia, incluso para precipitaciones de corta duración y baja intensidad ( Eroksuz and Rahman 2010; Suriya and Mudgal 2012).

Existen datos de anteriores investigaciones que estiman que el 90% de las precipitaciones pueden transformarse en escorrentía superficial en zonas urbanas impermeables, mientras que en entornos naturales permeables, este valor descendería como mínimo hasta un 25% (Suriya and Mudgal 2012). Además, multitud de estudios como los llevados a cabo por Christensen and Christensen (2003) han puesto de manifiesto la modificación en los patrones de las precipitaciones, tanto medias como extremas, asociadas al cambio climático. Estos patrones se verían modificados tanto en su nivel de ocurrencia, como en los valores de intensidades y volúmenes de lluvia, mostrando un incremento claro en las últimas décadas (Christensen and Christensen 2003).

En este marco, existen tres problemas fundamentales relacionados con la gestión del agua de lluvia en el entorno urbano: las inundaciones, la contaminación difusa y la falta de servicio al ciudadano.

Los problemas de inundaciones registrados en los últimos tiempos se han incrementado de tal forma que han llegado a generar una sensación de vulnerabilidad en los ciudadanos (Willems et al. 2011; Karamouz et al. 2011). En efecto, las inundaciones son el más común y costoso de los desastres naturales registrados anualmente a nivel mundial, como apuntaron Huang et al. (2008).

Los sistemas de drenaje de la mayor parte de las ciudades tratan de gestionar la totalidad del agua de lluvia haciéndola pasar a través de la Estación de Depuración de Aguas Residuales (EDAR), lo cual da lugar, en el mejor de los casos, a un sobrecoste económico muy importante debido al bombeo y tratamiento de un volumen de agua muy superior al de aguas negras. Sin embargo, en la mayoría de los casos, en épocas de lluvias, la red de sumideros no es capaz de captar todo el volumen de agua de escorrentía superficial contaminada, la cual acaba afectando zonas naturales con vertidos difusos de hidrocarburos, metales pesados y otros contaminantes peligrosos. Además, ante el ingente volumen de agua de lluvia captado y mezclado con las aguas negras, imposible de tratar en numerosas ocasiones, los depósitos de retención, las centrales de bombeo e incluso las propias EDAR se ven obligadas a producir alivios, conocidos como Descargas de Sistemas Unitarios (DSU), directamente al medio natural. Estos impactos ocasionados en la calidad del agua por la actual gestión del agua de lluvia en las ciudades, reciben el nombre de contaminación difusa (Brattebo and Booth 2003; Gilbert and Clausen 2006).

Además, una insuficiente gestión de las aguas pluviales puede producir multitud de consecuencias negativas en la sociedad, entre las que se pueden destacar problemas de índole sanitaria como trastornos físicos (lesiones, infecciones, enfermedades gastrointestinales, etc.) y síquicos entre otros (Fewtrell and Kay 2008). Estos efectos pueden verse empeorados drásticamente, provocando el aumento de la mortalidad en los lugares donde se produce un evento de inundación. Además de estos problemas, pueden apreciarse otros de gran calado como la erosión, la interrupción de negocios con el consecuente impacto en la economía regional e incluso nacional (Barredo 2007), los impactos en las actividades de construcción y las actividades agrícolas, la estética urbana

y los espacios verdes (Coupe et al. 2006; Fox et al. 2012). Igualmente, se identifican graves problemas de pérdidas de servicio en las infraestructuras de transporte y en los servicios urbanos generales de la ciudad (Acioli et al. 2005; Suarez et al. 2005), además de la pérdida del confort social, pérdidas de áreas verdes y natural asociado a los hábitat urbanos, parques y jardines (Castro Fresno et al. 2005). Destaca también por sus impactos sobre los ciudadanos el fenómeno conocido como isla de calor, debido al uso masivo de pavimentos impermeables asociado al crecimiento urbano (Asaeda et al. 1996; Haselbach et al. 2011). Este fenómeno consiste en el aumento de las temperaturas en los centros de las áreas urbanas debido a la falta de humedad y a la retención de la radiación solar y se ha visto incrementado en los últimos años con el cambio climático (Santamouris 2013). Por tanto, las zonas más densamente pobladas de los entornos urbanos y con peores condiciones medioambientales, tienen una temperatura muy superior a las zonas periurbanas con abundancia de áreas verdes (Livada et al. 2002).

#### **1.4.2 SOLUCIONES PARA MEJORAR LA GESTIÓN DEL AGUA DE LLUVIA EN LAS CIUDADES**

Los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) o simplemente conocidos como Sistemas de Drenaje Sostenible (en Inglés SuDS) surgen como una de las principales soluciones durante las últimas décadas para la gestión integral del agua de lluvia aportada. Para una explicación más detallada de la generación y desarrollo de estas técnicas, se hace necesario hacer un recorrido previo por las principales filosofías que radican detrás de dichas técnicas.

El Desarrollo de Bajo Impacto o “Low Impact Development” (LID) es una filosofía nacida en la Environmental Protection Agency (EPA) de los EEUU e implantada por primera vez de forma generalizada en el estado de Maryland a comienzos de los años 90 (Prince George's County 1999; US EPA 2000). Dicha filosofía puede definirse como una corriente de desarrollo basada en estrategias o técnicas de diseño que tiene por objetivo principal el mantener y replicar, de la forma más similar posible, el régimen hidrológico natural, la funcionalidad y el aspecto pre-existente del paisaje natural (Ando and Freitas 2011).

No obstante, la filosofía de desarrollo de bajo impacto no solo busca la recuperación del ciclo natural del agua, sino que además pretende lograrlo mediante

intervenciones de ingeniería que aumenten la belleza natural del espacio donde se implantan las técnicas LID (Newcomer et al. 2014). Las técnicas de drenaje utilizadas como medidas o estrategias para solucionar los problemas generados por el agua de lluvia se combinan perfectamente con el desarrollo de espacios verdes (US EPA 2012a). Dicha combinación se logra principalmente mediante el uso de vegetación natural dentro de los métodos de drenaje (Ando and Freitas 2011; Wang et al. 2013).

Los beneficios más importantes desde un punto de vista social y ambiental obtenidos a partir de la aplicación de las técnicas de drenaje LID pueden ser muy variados, destacando los siguientes:

- Adición de elementos estéticamente atractivos al vecindario (US EPA 2012a; Kabbes and Windhager 2010).
- Reducción de las velocidades de paso del tráfico rodado por las zonas urbanizadas, aumentando la sensación de seguridad entre los vecinos (Shapiro and Valentine 2010).
- Ofrece oportunidades recreativas a los vecinos a partir de la creación de zonas verdes, además de diseñar accesos pedestres de buen impacto visual y ambiental (Sutton 2010; Backhaus and Fryd 2013).
- Aumento de zonas en las que fijar el hábitat de especies animales y vegetales (Pinho et al. 2012; Qin et al. 2013).
- Reducción del efecto de isla de calor en las ciudades (Haselbach et al. 2011; Santamouris 2013).

La filosofía LID propone la minimización de las zonas impermeables para la recuperación del ciclo natural del agua dentro de las cuencas y de los ecosistemas (Davis 2005). Para ello, emergen las “stormwater LID techniques” o técnicas LID de gestión y control del agua de lluvia. Dichas técnicas tratan de atajar los problemas generados por el agua de lluvia en su punto de origen (Brown et al. 2010; Damodaram et al. 2010; Wang 2013). Su enfoque es de gran interés, puesto que busca transformar la visión negativa del agua de lluvia, tenida en muchas ocasiones por un residuo a evacuar de las ciudades, recuperando el concepto de agua de lluvia como un recurso crucial para el desarrollo de la vida (US EPA 2000; Nnadi 2009).

En paralelo, también en Estados Unidos, las Buenas Prácticas Ambientales (BPAs) para la gestión de aguas pluviales (Stormwater BMPs) son otra corriente de técnicas de

drenaje sostenible asimilables al medio para paisajes de nueva creación o para paisajes ya existentes que necesiten una rehabilitación (US EPA 2012b; Liao et al. 2013). Dentro de las Stormwater BMPs destacan:

- **Técnicas de biorretención.** Son diseñadas en función del tipo de suelo, las condiciones del lugar y los usos del suelo. Las más comúnmente utilizadas son: **Franjas vegetadas, Camas de arena y Áreas de encharcamiento.**
- **Pavimentos permeables** en sustitución de pavimentos convencionales impermeables en carreteras y caminos peatonales. Dentro de ellos pueden desarrollarse como una sub-técnica la **pavimentación porosa** con el objetivo de proporcionar una superficie estable para aumentar la capacidad de infiltración y permitir el crecimiento de césped.
- Inclusión de **cunetas verdes** en el diseño de **parques y jardines**, sustituyendo en muchos casos a elementos de hormigón.
- Sustitución de cubiertas impermeables en los edificios por **cubiertas verdes** para mejorar la captación de agua de lluvia, reduciendo la escorrentía superficial y la temperatura del edificio.

Existen otras filosofías como el “Water Sensitive Urban Design (WSUD)”, la cual podría traducirse al castellano como Diseño Urbano Sensible al Agua. Esta filosofía es similar a una parte de la filosofía LID (Roy et al. 2008): la corriente de recuperación de la funcionalidad hidrológica del terreno. Por lo tanto, no se debe confundir ni comparar la filosofía LID (ámbito medioambiental generalista) y la filosofía WSUD (focalizada en la gestión del agua de lluvia). Más bien, y por el contrario, esta última podría ser considerada como parte de la primera. Sirva como aclaración el siguiente esquema jerarquizado en el que se muestran las dos filosofías y sus respectivas técnicas de gestión del agua de lluvia (Figura 1).

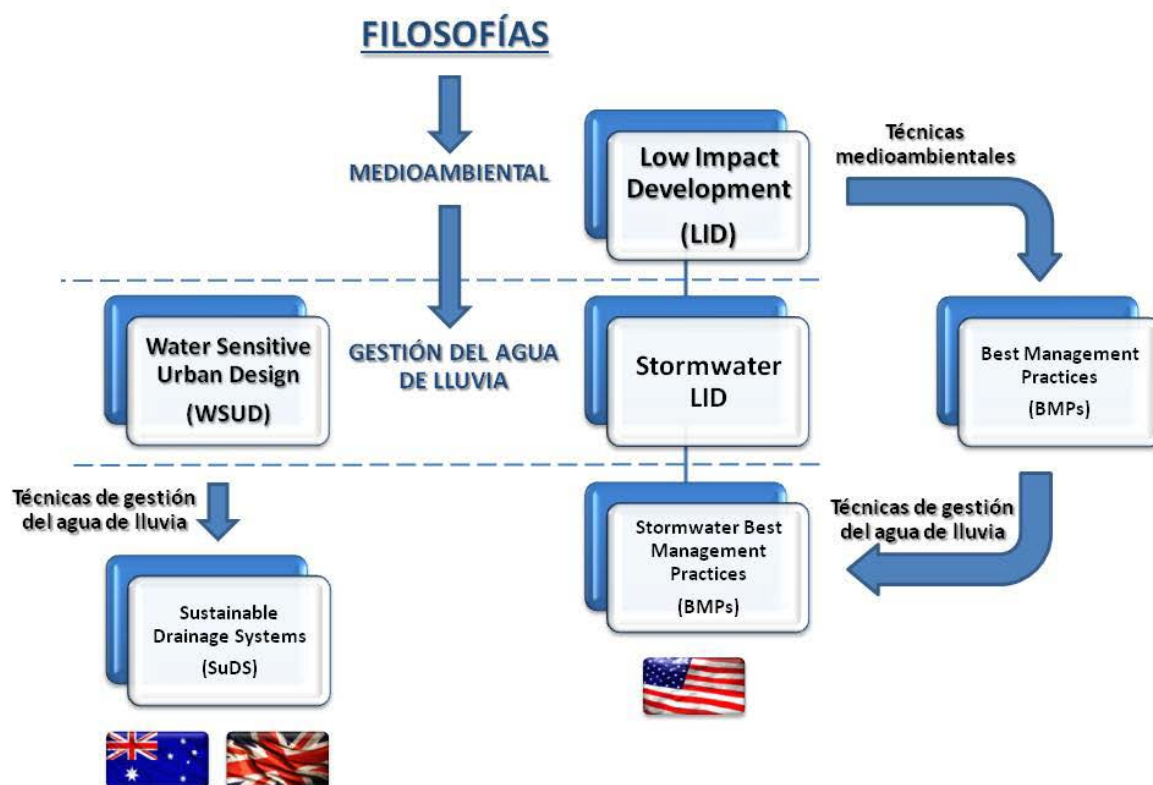


Figura 1. Esquema de las principales filosofías de gestión del agua de lluvia en el mundo y sus técnicas de gestión del agua de lluvia.

De la misma forma, se muestra en la Figura 1 el lugar de procedencia y aplicación de ambas filosofías. En el caso de la filosofía LID, tanto su origen como su aplicación se encuentra en EEUU (Roy et al. 2008), mientras que en el caso de la filosofía WSUD, su origen se encuentra en Australia (Morison and Brown 2011), siendo su lugar de aplicación Australia, Reino Unido y gran parte del resto de países que conforman la Commonwealth of Nations (antiguamente conocida como British Commonwealth of Nations). No obstante, el origen de las técnicas de gestión del agua de lluvia de la filosofía WSUD se encuentran en el Reino Unido, más concretamente en los Sustainable Urban Drainage Systems (SUDS) o Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS).

La filosofía de Diseño Urbano Sensible al Agua o WSUD trata de dar una respuesta conjunta a las principales preocupaciones de la sociedad con respecto al agua de lluvia (Hatt et al. 2004; Wong and Brown 2009). Preocupaciones como las inundaciones y las sequías, la calidad de los cursos de agua, la salud pública y el saneamiento, y el precio del agua y su tratamiento (Dahlenburg and Birtles 2012). Al igual que la filosofía LID, el WSUD pone en el centro de su corriente de pensamiento el agua como fuente a favor de la

sociedad, y no como un problema que ataca directamente al crecimiento de la misma. Los tres pilares sobre los que se asienta la filosofía WSUD son la cantidad (reducción de las puntas de caudal), la calidad (reducción de las sustancias contaminantes) y el servicio a la sociedad (Abbot et al. 2013). Como muestra, la visión integral del drenaje sostenible queda reflejada en la Figura 2.



Figura 2. Sectores de la esfera de la visión integral del drenaje sostenible.

No obstante, existen barreras difíciles de superar para la completa aplicación de las filosofías WSUD (Roy et al. 2008; Abbot et al. 2013):

- Insuficientes conocimientos y habilidades profesionales en la materia.
- Resistencia inicial por parte de las empresas y de los entes públicos debido al miedo al riesgo hacia las nuevas tecnologías.
- Falta de políticas que permitan el desarrollo de estas tecnologías.
- Incentivos limitados en la ley por implantar esta filosofía mediante sus técnicas de gestión del agua de lluvia.
- Necesidad de crear una cultura de gestión del agua de lluvia tanto en organizaciones como en la sociedad.

Se identifican las siguientes áreas de beneficio a partir de la aplicación de la filosofía WSUD (Hatt et al. 2004; Dahlenburg and Birtles 2012):

- Calidad del agua.
- Gestión de los riesgos de inundación.
- Agricultura urbana y rural.
- Energía / carbón.
- Aguas residuales.



- Suministro de agua.
- Salud y bienestar.
- Economía.
- Lugar y comunidad.
- Hábitat y biodiversidad.
- Adaptación microclimática.

Finalmente, la filosofía WSUD propone tres grupos de técnicas fundamentales de medida del valor añadido aportado por su aplicación mediante SuDS no estructurales (Abbot et al. 2013):

- **Económicas**. Se usarán técnicas de validación económicas que midan el impacto monetario de las medidas adoptadas sobre la economía local, regional o nacional.
- **Cuantitativas**. Tareas realizadas, hectáreas de terreno afectadas por las medidas adoptadas y visitantes o usuarios de la zona. En esta medida quedarían encuadradas de forma intrínseca aquellos indicadores cuantitativos relativos a la medida de la satisfacción de la sociedad en relación a las medidas adoptadas.
- **Cualitativas**. Medidas que permitan mostrar evidencias claras de una mejora económico-social y beneficios medioambientales al ecosistema con el que se interactúa.

Algunos autores como Ellis et al. (2004), Martin et al. (2006) y Urrutiaguer et al. (2010) han puesto de manifiesto la gran utilidad de los análisis multicriterio para analizar el valor y el impacto de la aplicación de los SuDS o medidas WSUD sobre el lugar de implementación de las mismas. El análisis coste vs. beneficio comparando los SuDS con los sistemas de drenaje convencional ha sido hasta la fecha el sistema de análisis más utilizado, siendo usualmente requerido para medir el valor económico de las medidas adoptadas como muestran trabajos como los de Stovin y Swan (2007), y Duffy et al. (2008). Sin embargo, el análisis multicriterio presentaría una mayor potencia teniendo en cuenta los tres vértices fundamentales del triángulo de la sostenibilidad (sociedad, medio ambiente y economía), además de factores fundamentales para un SuDS como los costes operativos durante su vida útil y el mantenimiento (Ellis et al. 2004).

Las técnicas del WSUD que permiten dar respuesta sobre el terreno a los

problemas generados por el agua de lluvia son los Sistemas de Drenaje Sostenible, conocidos como Sustainable Drainage Systems (SuDS) en literatura anglosajona. Inicialmente, cuando estas técnicas eran utilizadas exclusivamente en un ámbito urbano recibían el nombre de Sustainable Urban Drainage Systems (SUDS), comúnmente traducidas al castellano como Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS). Sin embargo, en los últimos tiempos se ha generado una corriente que trata de generalizar más el uso de estos sistemas en ámbitos más extensos al urbano. Tal es el caso del uso de algunos SUDS utilizados ampliamente en vías de transporte como carreteras o autopistas como los drenes filtrantes o drenes franceses. De ahí que se haya extendido el uso de Sustainable Drainage Systems (SuDS) para englobar todas las aplicaciones posibles de estas técnicas en distintos ámbitos.

Con todo, son numerosas las terminologías usadas en la actualidad para referirse a este tipo de técnicas de drenaje sostenible, variando en función del país como se muestra a continuación en algunos de los ejemplos más significativos:

- EEUU: **Stormwater Best Management Practices** (BMPs) o LID techniques.
- Reino Unido y algunos países de la Commonwealth of Nations: **Sustainable Drainage Systems** (SuDS) o **Sustainable Urban Drainage Systems** (SUDS) para el caso de un ámbito urbano de aplicación.
- España: **Sistemas Urbanos de Drenaje sostenible** (SUDS) o **Técnicas de Drenaje Urbano Sostenible** (TDUS).
- Gran parte de Latinoamérica: **Mejores Prácticas de Control** (MPC).
- Chile: **Técnicas Alternativas de Drenaje** (TAS).

En resumen, las técnicas SuDS se asientan sobre los tres pilares fundamentales de la sostenibilidad: economía, medio ambiente y sociedad; siendo sus tres objetivos principales:

- **Control y gestión de la cantidad de agua**. Laminación de los caudales de escorrentía superficial generados a partir del agua de lluvia caída (especialmente en precipitaciones de intensidades extremas) sobre superficies impermeables (Faram et al. 2010; Swan and Smith 2010).
- **Control, gestión y recuperación de la calidad del agua de lluvia**. Mejora de la calidad del agua de lluvia mediante la retención y tratamiento de los contaminantes presentes en la escorrentía superficial, haciendo frente a la

contaminación difusa (Rushton 2001; Rowe et al. 2009) compuesta por metales pesados y los hidrocarburos procedentes de los vehículos, además de las basuras y restos vegetales y animales (US EPA 2000).

- **Valorización y preservación del paisaje urbano.** Dotar de un valor extra a zonas deprimidas, tanto a nivel de ciudad como a nivel regional, a través de la recuperación de las funciones hidrológicas del agua de lluvia, de un tratamiento estético y paisajístico, y de la conservación del patrimonio histórico-artístico. Se trata también de preservar y proteger las condiciones naturales pre-existentes en la zona donde se implantan (Dietz 2007).

### 1.4.3 CLASIFICACIONES DE LOS PRINCIPALES SISTEMAS DE DRENAJE SOSTENIBLE

Los SuDS pueden clasificarse de multitud de formas distintas basadas en diferentes criterios. Algunas de las clasificaciones más relevantes se detallan a continuación. La primera de ellas vendría dada por el papel de los SuDS con respecto al drenaje convencional. Esta perspectiva fue tratada en detalle por Temprano González et al. (1996), quienes propusieron dos clasificaciones basadas en dicho rol. Por un lado, clasificaron los SuDS en función del orden respecto del sistema de alcantarillado sobre el que se aplican:

- **Control en el origen.** Medidas aplicadas de forma previa al sistema de drenaje urbano convencional.
- **Control de los vertidos.** Medidas aplicadas a la salida de ciertos elementos que constituyen parte de la red urbana de drenaje convencional.

Por otra parte, Temprano González et al. (1996) clasificaron los SuDS en función del grado de intervención necesario para la implementación de los mismos en la red de drenaje convencional:

- **Medidas no estructurales.** Fueron definidas por estos autores como medidas externas a la red de drenaje urbano convencional, como pueden ser considerados el diseño y construcción de un pavimento permeable o la higiene urbana.
- **Medidas estructurales.** Temprano González et al. (1996) definieron este tipo de medidas como las mejoras practicadas a la red de drenaje urbano convencional, tales como la modificación de los volúmenes de almacenamiento o el tratamiento de los reboses de la red.

Posteriormente, Castro Fresno et al. (2005) propusieron la que podría ser considerada como la primera clasificación de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) propiamente dicha en habla hispana. Dicha clasificación se dividió entre los siguientes grupos:

- Medidas preventivas.
- Superficies permeables.
- Pozos y zanjas de infiltración.
- Depositos de infiltración.
- Drenes filtrantes o franceses.
- Cunetas verdes.
- Zanjas filtrantes.
- Depositos de detención.
- Estanques de retención.
- Humedales.

En la línea de Temprano Gonzalez et al. (1996), otros autores como Taylor y Fletcher (2007) calificaron las medidas no estructurales como aquellas medidas de gestión destinadas a la formación, educación y divulgación de los SuDS, continuando con la propuesta de significado dada para los BMPs no estructurales.

Rodríguez Hernández (2008) propuso la siguiente clasificación englobando doce técnicas en cuatro grandes categorías:

- **Medidas preventivas.**
  - **Legislación.**
  - **Formación.**
  - **Inversión.**
- **Sistemas de infiltración.**
  - **Superficies permeables.**
  - **Pozos de infiltración y zanjas de infiltración.**
  - **Depósitos de infiltración.**
- **Sistemas de captación y transporte.**
  - **Drenes filtrantes o drenes franceses.**
  - **Cunetas verdes.**
  - **Franjas filtrantes.**

— **Sistemas de tratamiento pasivo.**

- **Depósitos de detención.**
- **Estanques de retención.**
- **Humedales artificiales.**

Fernández Barrera (2010) se sumó a la tendencia marcada por autores como Temprano Gonzalez (1996) y Taylor y Fletcher (2007), y propuso la siguiente clasificación conteniendo el término de medida estructural. De esta forma su clasificación quedó de la siguiente manera:

- **Medidas de gestión.** Las medidas de gestión podrían ser calificadas como las medidas no estructurales de Taylor y Fletcher (2007), quedando divididas a su vez en dos grandes grupos:
  - ***Medidas para la educación y la concienciación ciudadana.***
  - ***Medidas para la gestión de la formación y la divulgación de las metodologías y técnicas de los SuDS.***
- **Medidas estructurales.** Se trataría de la aplicación sobre el terreno de medidas de tipo constructivas.

Fernández Barrera (2010) propuso además otra clasificación que sintetizaba conceptos y visiones recogidas en anteriores propuestas. Así, propuso una clasificación que englobaba la integración de los SuDS en el paisaje y en el drenaje convencional existente, desarrollando este criterio a partir de Temprano González et al. (1996):

- **Sistemas integrados en el paisaje.** Este autor definió dos sub-grupos de sistemas sostenibles integrados en el paisaje, los cuales pueden llegar a modificarlo:
  - ***Estructuras de drenaje.*** Dentro de este sub-grupo se pueden encontrar sistemas tales como los firmes permeables, las cubiertas vegetadas, los pozos y zanjas de infiltración, los drenes filtrantes y las franjas filtrantes.
  - ***Elementos de retención superficial de las aguas.*** En este segundo sub-grupo, los depósitos de infiltración, las cunetas verdes, los depósitos de detención superficial, los estanques de retención y los humedales artificiales serían los principales sistemas constituyentes del mismo.
- **Sistemas integrados en el drenaje convencional.** Fernández Barrera (2010)

definió este grupo de sistemas como aquellos sistemas diseñados para ser un complemento de los sistemas de drenaje convencional para la captación y el transporte de las aguas pluviales. Como ejemplo de este grupo el autor seleccionó los siguientes sistemas de drenaje sostenible:

- ***Cestas de retención.***
- ***Trampas de sedimentos.***
- ***Separadores hidrodinámicos.***
- ***Separadores de aceites y sedimentos.***

Por último, y a modo de síntesis de todas las clasificaciones anteriores el autor de esta tesis doctoral propuso la siguiente clasificación de SuDS, siendo la principal referencia para desarrollos posteriores llevados a cabo en la Universidad de Cantabria:

- **Sistemas de gestión (SG).** Podría considerarse a este grupo como un heredero directo de las medidas no estructurales. En este sentido, dichos SG se caracterizarían por ser conjunto de decisiones y medidas en las que las instituciones públicas jugasen un papel importante. Como sistemas de gestión se pueden distinguir los siguientes:
  - ***Medidas de prevención o medidas preventivas.***
  - ***Medidas para la educación.***
  - ***Gestión de la formación.***
  - ***Medidas de divulgación.***
- **Sistemas constructivos (SC).** Los sistemas constructivos hacen referencia a su vez a las técnicas constructivas utilizadas directamente sobre el terreno para la gestión del agua de lluvia. Estas técnicas constructivas están divididas a su vez en tres grandes grupos:
  - ***Sistemas constructivos de control en el origen.*** Estas técnicas constructivas permiten la captación del agua de lluvia y su posterior infiltración. Estas técnicas representan por tanto un elemento básico de control de la escorrentía superficial, laminando las puntas de caudal. Como ejemplos de este tipo de técnicas de drenaje destacan:
    - ***Firmes permeables.***
    - ***Pozos y zanjas de infiltración.***
    - ***Depósitos de infiltración.***
  - ***Sistemas constructivos de transporte.*** Serían considerados como

técnicas de transporte aquellas técnicas de drenaje sostenible que guían de forma lenta la escorrentía superficial hasta los puntos seleccionados para su descarga, y que tratan dicha escorrentía reduciendo su contenido de sustancias contaminantes. Dicho tratamiento consiste en la oxigenación e infiltración del agua a través de los materiales utilizados en estas técnicas de transporte. Cabe destacar las siguientes técnicas de transporte:

- ***Drenes filtrantes o drenes franceses.***
- ***Franjas filtrantes.***
- ***Cunetas verdes.***
- ***Sistemas constructivos de almacenamiento.*** Estos sistemas constructivos son diseñados para colaborar en la gestión del agua de lluvia en cuencas vertientes de gran tamaño. Contribuyen en la mejora de la calidad del agua de lluvia convertida en escorrentía superficial a través del almacenamiento de la misma durante un largo periodo de tiempo. Entre los sistemas de almacenamiento se pueden destacar los siguientes:
  - ***Depósitos de detención.***
  - ***Estanques de retención.***
  - ***Humedales naturales y artificiales.***

#### 1.4.4 VENTAJAS E INCONVENIENTES DE LOS SISTEMAS DE DRENAJE SOSTENIBLE

Existe un amplio consenso a la hora de destacar cuáles son las principales ventajas aportadas por la aplicación de técnicas de drenaje sostenible, pudiendo resumirse en las siguientes:

- **Prevención y minimización de inundaciones.**
- **Protección y mejora de la calidad del agua y de la biodiversidad** existente en los ecosistemas con los que interactúan los SuDS.
- Mantenimiento del flujo natural del agua en aquellas zonas naturales donde se proyecte cualquier tipo de nueva construcción y **restauración del flujo natural del agua** en aquellas zonas donde ya exista algún tipo de construcción que haya alterado dicho ciclo.
- **Protección frente a vertidos accidentales**, y pérdidas económicas y ambientales derivadas de dichos vertidos contaminantes.

- **Cooperación** con el **desarrollo urbano sostenible** en aquellos puntos donde el drenaje convencional se ha visto colapsado en el pasado.
- **Enriquecimiento visual y ambiental de la ciudad.**
- **Posibilidad de llevar a cabo la recarga** de las **aguas subterráneas.**

En cuanto a los principales inconvenientes de la aplicación de las medidas y técnicas SuDS, se han identificado los siguientes:

- Necesidad de un mantenimiento específico y periódico. Este punto conlleva, obviamente, un **aumento del coste económico y operacional.**
- La existencia de **malas experiencias** en la aplicación de las técnicas constructivas SuDS debidas a la falta de referencias.

Por tanto, son mayores las ventajas que las desventajas asociadas a los SuDS, siendo necesarias investigaciones como la recogida en esta tesis para resaltar dichas ventajas y hacer frente mediante la generación de conocimiento a las desventajas.



## **CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE**



## 2.1 FIRMES PERMEABLES

### 2.1.1 DEFINICIÓN Y ESTRUCTURA

Los firmes permeables son una de las técnicas de drenaje sostenible más ampliamente utilizadas en el mundo. Desde los primeros estudios llevados a cabo a principios de los años 70 del siglo XX en Estados Unidos se ha venido demostrando su alta capacidad como elemento de control de la escorrentía superficial (Castro-Fresno et al. 2013).

Rodriguez-Hernandez (2008) definió los firmes permeables como “secciones compuestas de varias capas de materiales de construcción que permiten el paso del agua a través suyo, desde la superficie hasta la explanada, y en conjunto ofrecen la capacidad portante necesaria para resistir un tráfico determinado”.

Además, un firme permeable debe ser capaz de cumplir con los tres sectores de la esfera de la visión integral del drenaje sostenible (Figura 2), definiendo de esta forma los tres objetivos fundamentales de un firme permeable como técnica de drenaje sostenible:

1. Un firme permeable debe ser capaz de reducir los caudales punta de la escorrentía superficial generada por la lluvia (sector de cantidad de agua), reduciendo por tanto de forma implícita los riesgos de inundación (Forsberg et al. 2005; Ellis and Revitt 2010).
2. Un firme permeable debe ser capaz de reducir los contaminantes presentes en la escorrentía superficial (sector de calidad de agua) mediante el proceso de infiltración a través de todas las capas del firme permeable (Coupe et al. 2006; Gomez-Ullate et al. 2010b).
3. Un firme permeable debe aportar una superficie segura para el tránsito tanto de personas y/o animales cuando los firmes sean diseñados para caminos peatonales y/o agrícolas, como para el tráfico rodado de vehículos cuando los firmes sean diseñados para tal efecto (sector de servicio a la sociedad), debiendo estar perfectamente integrado en el lugar en el cual se va a construir mediante un acabado correcto, tanto desde un punto de vista ambiental como paisajístico (Jayasuriya et al. 2007a; Rodriguez-Hernandez et al. 2012).

No obstante, existe por lo general una gran confusión en la definición de los firmes permeables, refiriéndose en muchas ocasiones a pavimentos permeables o superficies permeables, cuando en realidad se está hablando de la estructura completa de un firme permeable, o viceversa, en cuyo caso la confusión sería aún mayor. Por lo tanto, y con el afán de evitar este tipo de confusiones debe quedar claro que la superficie es la capa del firme en contacto con la atmósfera, el pavimento es el conjunto de capas superiores que incluye al menos la superficie y la capa base, siendo la parte superior del firme completo, compuesto además por las capas inferiores situadas sobre la explanada.

Antes de proponer una estructura del firme permeable lo más completa posible, se estima conveniente repasar y dar algunos ejemplos de estructuras descritas en anteriores trabajos por otros investigadores, destacando aquellas cuyo uso está bastante extendido en el ámbito del drenaje sostenible. La estructura de un firme permeable ha sido analizada por tanto desde distintos enfoques.

Por un lado, Collins et al. (2008a) y Hunt y Collins (2008) propusieron un enfoque práctico, el cual está bastante generalizado a lo largo de las investigaciones llevadas a cabo por todo el mundo. Su estructura propuesta es la siguiente:

- **Capa superficial**. Formada por la superficie permeable.
- **Capa de grava**. Usada para todos los firmes permeables con capas superficiales que no sean de hormigón poroso, en cuyo caso se puede obviar su uso.
- **Capa de sub-base**. Capa inmediatamente inferior a la capa de base o capa de grava.
- **Capa de sub-drenes**. Capa conformada por drenes de plástico situados cerca de la parte inferior de la sub-base. Su principal misión es recoger el agua infiltrada. Su uso es habitual cuando el firme permeable está construido sobre suelos arcillosos.

Por otra parte, Scholz y Grabowiecki (2007) propusieron un enfoque más teórico, definiendo la estructura de un firme permeable en función de la zona de la saturación de los materiales que conforman las distintas capas:

- **Pavimento permeable (seco o semisaturado)**.
- **Capa de apoyo del pavimento permeable (seca o semisaturada)**.
- **Zona no saturada del material de base**.

- **Zona saturada del material de base.**
- **Sub-base (supuestamente saturada, si bien podrían llegar a diferenciarse dos zonas la igual que en la base).**

Además, Totah-Maharaj (2009) siguiendo la anterior clasificación introduce elementos para el aprovechamiento de energía geotérmica como parte de la estructura de un firme permeable.

Combinando ambos enfoques, Rodríguez Bayón (2008) definió las siguientes capas en un firme permeable:

- **Pavimento.** Capa superficial del firme con una función fundamentalmente resistente y estética.
- **Base.** Esta capa es la que aporta la parte fundamental de resistencia cuya permeabilidad es superior a la capa anterior para garantizar la infiltración en el firme permeable.
- **Sub-base.** Capa más interna del firme que sirve de cimiento del mismo y con una permeabilidad mayor a las anteriores para asegurar la capacidad de infiltración.
- **Explanada.** Es la capa que absorbe todos los esfuerzos procedentes de las capas superiores. Si el firme permeable tiene función de recarga del suelo adyacente, esta capa deberá tener la permeabilidad necesaria.

En estas clasificaciones las capas de geosintéticos no aparecen reflejadas de forma explícita, aunque sí quedan incluidas implícitamente. A este respecto, el uso del geotextil está ampliamente generalizado en la actualidad entre base y subbase, especialmente entre las investigaciones en firmes permeables, y sus beneficios están ampliamente demostrados (Newman et al. 2002; Coupe et al. 2003; Scholz and Grabowiecki 2007; Gomez-Ullate et al. 2010a; Scholz 2013). Entre las funciones de este material destacan la de separar capas granuales de distinta granulometría y servir de filtro. Además, el geotextil presenta una propiedad aún si cabe más importante que las anteriores: ser el soporte para el desarrollo de los microorganismos biodegradantes de las sustancias contaminantes. En otras ocasiones el geosintético es una geomembrana con la función de impermeabilizar. Gomez-Ullate Fuente (2011) propuso por tanto la siguiente clasificación basada en Rodríguez Bayón (2008) incluyendo al geotextil como parte de un firme permeable:

- **Capa de pavimento.**
- **Base.**
- **Geotextil.**
- **Sub-base.**
- **Geomembrana.**
- **Explanada.**

Tras el análisis de las anteriores clasificaciones, se procede a proponer la siguiente estructura de firme permeable para la presente tesis (Figura 3):

- **Pavimento permeable.** Parte superior de la estructura de un firme permeable, en contacto con la atmósfera, que está formada a su vez por las capas de superficie permeable y base. Sus funciones principales son las de captar e infiltrar el agua de lluvia y de la escorrentía superficial hacia el interior del firme permeable, además de dotar de un correcto acabado estético al firme permeable para su integración paisajística, pues se trata de su capa vista. Además, tiene una importante función resistente dentro de la estructura del firme, transmitiendo las cargas a las que se ve sometido el pavimento hacia las capas inferiores del firme.
  - La **superficie permeable** es la capa del pavimento permeable que está en contacto con la atmósfera y permite el paso del agua a través suyo. Además, esta capa debe tener un acabado estético superior al del resto de capas del firme permeable dado que se trata de la capa vista del mismo.
  - **Base.** Capa habitualmente constituida por material granular de tamaños en un rango de 4 a 6 mm de diámetro, absorbiendo las cargas a las que está sometida la superficie y transmitiéndolas hacia las partes inferiores del firme, especialmente la sub-base.
- **Sub-base.** Capa inferior del firme permeable que puede estar en contacto directo con el terreno natural con el objetivo de infiltrar el agua recogida por el firme permeable al terreno, permitiendo la recarga de acuíferos (Haselbach et al. 2006; Scholz and Grabowiecki 2009), o por el contrario puede estar impermeabilizada para poder almacenar el agua infiltrada en la capa de sub-base (Coupe et al. 2006). Dicha capa está compuesta habitualmente por árido de distinta procedencia con porosidades cercanas al 30-40% o por estructuras de plástico con un volumen de huecos superior

al 90%.

- **Explanada**. La calidad de dicha capa sobre la que apoyará el firme permeable determinará el diseño del mismo en términos de resistencia de cargas.
- **Elementos opcionales**: Elementos que doten al firme permeable de propiedades extras con el fin de alcanzar unas determinadas aplicaciones. Algunos de ellos pueden ser:
  - **Geosintético**. Esta capa, en caso de existir, suele estar formada por un geotextil. Su función principal es la de actuar como filtro del agua infiltrada junto con los sedimentos arrastrados por la escorrentía y de separación entre las capas granulares de base y sub-base. Además, existe otra función destacada del geotextil, que quizá sea la más importante, como ya se citó con anterioridad: depuración de sustancias contaminantes. También se puede utilizar una capa de geosintético impermeable para poder almacenar el agua de lluvia captada en el firme.
- **Tuberías de conexión con el drenaje convencional**. Este elemento de conexión con el drenaje convencional puede definirse como un elemento cuasi externo al firme permeable, o simplemente como un elemento de conexión. Su uso está extendido en aparcamientos para vehículos de tráfico ligero con función de almacenamiento con la misión de recoger el exceso de agua infiltrada cuando ésta supera la capacidad de almacenamiento de la sub-base del firme permeable.
- **Capa para el aprovechamiento de energía geotérmica**. Uso de intercambiadores de calor horizontales bajo la sub-base del firme permeable en combinación con la estructura del firme para el aprovechamiento energético del agua almacenada en la sub-base (Tota-Maharaj et al. 2011).

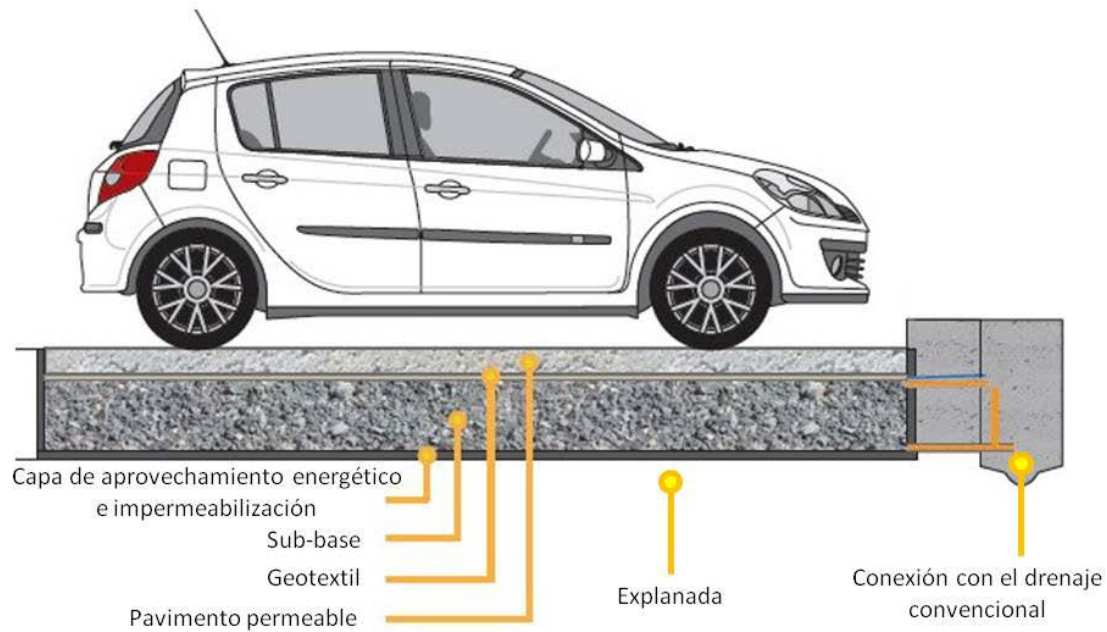


Figura 3. Estructura de firme permeable propuesta.

### 2.1.2 TIPOLOGÍAS

Una vez definida la estructura de los firmes permeables, se procede a su clasificación en función de diversos criterios, que pueden ir desde el tipo de superficie permeable (Pratt et al. 2002; Ferguson B.K. 2005; Jayasuriya et al. 2007a; Rodríguez-Hernandez 2008; Lucke and Beecham 2011a), hasta el destino final del agua infiltrada a través de la estructura del firme permeable (Rodríguez-Hernandez 2008).

Se comenzará inicialmente mostrando las clasificaciones propuestas para un firme permeable en función del tipo de superficie permeable utilizada. Así, la clasificación propuesta por Pratt et al. (2002) para la publicación del CIRIA C582 sobre el control en origen a través de superficies permeables en el Reino Unido, podría considerarse como una de las primeras y más completas. Pratt et al. (2002) exponen el concepto de “pervious surfaces”, lo que se traduciría a efectos prácticos como superficie penetrable por el agua, y partir de este concepto, dividen los tipos de superficies de la siguiente forma:

- **Superficie porosa (Porous surface).** Aquella en la que el proceso de infiltración se produce a través de poros repartidos por toda el área en contacto con el agua. Dentro de este apartado estarían incluidas las siguientes superficies:



- Suelos abiertos o materiales granulares (Open-textured soil or granular material).
- Grava o césped protegidos con geosintéticos (Geosynthetic gravel / grass protection systems).
- Adoquines y baldosas porosas (Small porous elemental surfacing blocks).
- Aglomerados porosos (Continuous-laid porous material) como por ejemplo hormigón poroso y asfalto poroso.
- **Superficie permeable (Permeable Surface).** Aquella formada por materiales impermeables dispuestos en forma permeable que permiten la infiltración a través del área de los huecos y ranuras existentes entre ellos. Por lo tanto, esta definición es excluyente para las superficies porosas. Dentro de este apartado estarían incluidas las siguientes superficies:
  - Elementos prefabricados de hormigón con suelo o césped dentro de ellos (Large elemental surfacing blocks).
  - Bloques prefabricados de hormigón (Small elemental surfacing blocks).
  - Materiales permeables de puesta en obra continua (Continuous-laid permeable material).

Ferguson (2005) por su parte propuso la siguiente clasificación basada en su amplia experiencia de diseño de firmes permeables en Estados Unidos:

- 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.

Jayasuriya et al., (2007b) propusieron por su parte otra clasificación similar a la ofrecida por Pratt et al. (2002):

- Superficie porosa. Superficie que permite la infiltración a través de toda su

área gracias a la presencia de poros abiertos e interconectados.

- Superficie permeable. Superficie que permite la infiltración a través de los huecos y ranuras existentes entre las diferentes piezas impermeables que lo conforman.

Otros autores como Lucke y Beecham (2011b) dividen las superficies permeables en cuatro categorías:

- Pavimentos de hormigón impermeable con juntas anchas (concrete pavers with wide joints).
- Pavimentos de hormigón impermeable con aberturas (concrete pavers with apertures).
- Pavimentos de hormigón poroso (porous concrete pavers).
- Asfalto poroso (porous asphalt).

En los dos primeros casos presentados por Lucke y Beecham (2011b) la infiltración se produce a través de las juntas, huecos o aberturas que hay en la superficie permeable que conforman. Mientras que en los dos casos finales de superficies de aglomerados porosos la infiltración se produce a través de toda la superficie del material, siendo consideradas por tanto como superficies permeables porosas. Para aclarar las diferencias entre pavimentos de hormigón impermeable con juntas anchas y con aberturas, el autor de dicha clasificación (Lucke and Beecham 2011a) mencionó que las aberturas hacen referencia a diseños particulares de los adoquines que responden a huecos a lo largo de todo el perímetro del adoquín, mientras que las aberturas son huecos de mayor tamaño localizados entre adoquines, pero no a lo largo de todo el perímetro.

No obstante, la que puede considerarse como la clasificación más completa ofrecida hasta la fecha fue la recogida en la tesis de Rodríguez Hernández (2008), quien, basándose en Pratt et al. (2002), aunó el criterio de tipología de la superficie permeable con el criterio del destino final del agua, generando una clasificación combinada, resumida a continuación:

- Según el pavimento permeable:
  - Pavimentos permeables discontinuos.
    - Césped o grava con refuerzos.
    - Adoquines con ranuras.
  - Pavimentos permeables continuos.

- Mezcla bituminosa porosa.
  - Hormigón poroso.
- Según el destino final del agua:
- Infiltración.
  - Almacenamiento.
  - Drenaje diferido.

Ampliando esta clasificación, en un esfuerzo final de síntesis, con el objetivo de englobar los enfoques de todas las anteriores, y sumando el criterio del tipo de material de sub-base, en esta tesis doctoral se propone la clasificación de firmes permeables recogida en la Tabla 1.

Tabla 1. Clasificación propuesta para un firme permeable según el tipo de pavimento permeable empleado, según el material utilizado en la sub-base y según el destino final del agua infiltrada a través de su estructura.

PAVIMENTO PERMEABLE	Superficie	Aglomerados porosos	Asfalto poroso
			Hormigón poroso
		Elementos prefabricados (adoquines o baldosas) porosos, con ranuras o con juntas que permitan su disposición permeable	
		Suelo abierto o materiales granulares con permeabilidad alta y sin refuerzo alguno	
		Grava o césped reforzados con geosintéticos o con elementos prefabricados	
SUB-BASE	Material granular sin finos	Árido de machaqueo	
		Árido reciclado	Valorizados de residuos industriales
			RCD
	Prefabricados	Plástico	
		Otros materiales	
DESTINO FINAL DEL AGUA	Infiltración al terreno	Para recarga de acuíferos	
	Almacenamiento	Para riego y/o limpieza	
		Para valorización energética (mediante geotermia)	
	Drenaje diferido al drenaje convencional o a otro SuDS		

### 2.1.3 VENTAJAS E INCONVENIENTES

La principal ventaja que aportan los firmes permeables es la reducción de la cantidad de escorrentía superficial, retardando y reduciendo los picos de ésta que se producen debido a fuertes lluvias (Pratt et al. 1995; Brattebo and Booth 2003; Castro Fresno et al. 2005; Bean et al. 2007a; Kwiatkowski et al. 2007). Estudios llevados a cabo en Carolina del Norte han demostrado que se puede llegar a reducir la cantidad de escorrentía superficial mediante el uso de pavimentos permeables con superficies de adoquines con ranuras entre un 97 y un 98%, siendo incluso mayor en el caso de las superficies de hormigón poroso (99%) (Collins et al. 2006; Bean et al. 2007b; Hunt and Collins 2008).

Por su parte, Castro et al. (2005) muestran las principales ventajas de las superficies permeables en contraposición a las impermeables, además de la reducción de la escorrentía superficial:

- Disminuyen las puntas de caudal en los sistemas de drenaje y en los cauces receptores.
- Pueden mejorar la calidad del agua en gran medida por filtración, absorción y biodegradación.
- 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.

Los firmes permeables proporcionan otro tipo de ventajas, además de las ya expuestas anteriormente. Estas ventajas son fundamentalmente sociales. Además de las mejoras estéticas, aumentan la seguridad y la comodidad de los ciudadanos en tiempo de lluvia. Reducen el riesgo de accidentes de tráfico. Los firmes permeables permiten el almacenamiento del agua de lluvia para su posterior reutilización (McBride and Knapton 2006).

Finalmente, se enumeran algunas de las ventajas fundamentales de las dos categorías expuestas por Rodríguez-Hernandez (2008) en su clasificación de firmes permeables:

- Firmes permeables con pavimentos discontinuos:
  - Excelente estética: Seguramente sean los adoquines los más versátiles y los que mejor acabado estético posean.
  - Restitución sencilla: el carácter modular de este tipo de pavimentos permite su fácil cambio en el momento en que alguno de ellos falla.
- Firmes permeables con pavimentos continuos:
  - Menor coste de ejecución por metro cuadrado: los materiales que se emplean se pueden colocar fácilmente en obra y su coste es barato.
  - Puesta en obra rápida y cómoda para grandes superficies: la puesta en obra de los materiales porosos de hormigón o mezcla bituminosa es continua, rápida y sencilla.

Los principales inconvenientes que presentan los firmes permeables son los siguientes (Rodríguez-Hernandez 2008):

- Colmatación.
- Degradación.
- Desconocimiento y desconfianza.

Existen una serie de limitaciones en el uso de los firmes permeables. La colmatación y la degradación de estos firmes son factores decisivos en estas limitaciones. La colmatación es uno de los inconvenientes más graves, limitando la capacidad de infiltración del firme permeable, y se debe a los aportes de materiales sueltos, la acción del viento o el régimen de precipitaciones. La degradación se puede deber a ciclos de hielo-deshielo o zonas de alta intensidad de tráfico. Las limitaciones de aplicación de los firmes permeables se resumen en (Ferguson B.K. 2005):

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

Con todo, el buen funcionamiento de un firme permeable depende de una correcta selección, diseño, ejecución y mantenimiento de los elementos que lo componen (Ferguson 2006).

Siguiendo la clasificación de Rodríguez-Hernandez (2008), los principales inconvenientes en función de las dos categorías de firmes permeables son:

- Firmes permeables con pavimentos discontinuos:
  - Mayor coste de ejecución debido al coste de los materiales.
  - Puesta en obra lenta y laboriosa.
  - Pueden resultar incómodos de pisar y de rodar debido a su discontinuidad.
- Firmes permeables con pavimentos continuos:
  - Estética limitada por su acabado continuo.
  - Difícil restitución ya que requieren fresado, limpieza y bacheado.

Como ya se ha expuesto, la colmatación es el problema que más afecta a la infiltración de una superficie permeable. Sin embargo, se ha demostrado que la colmatación no es un factor que influya decisivamente en la calidad del agua de lluvia infiltrada (Kadurupokune and Jayasuriya 2009). Para ello se realizaron ensayos en la RMIT University (Australia) utilizando un simulador de lluvia (Jayasuriya et al. 2007a) y superficies permeables con diferentes cargas contaminantes, hasta llegar al equivalente de los 17 años de vida. En ese momento comprobaron que la capacidad de infiltración se había reducido en un 10%, mientras que la reducción en la eliminación de sólidos en suspensión, aceites y cobre, únicamente descendió de un 98% a un 80%. Además, con estos estudios se demostró que la vida útil de los pavimentos permeables puede superar los 17 años sin problemas graves (Jayasuriya et al. 2007a; Jayasuriya et al. 2007b).

Analizando en detalle el problema de la colmatación, las partículas que colmatan las superficies permeables suelen ser fundamentalmente arenas con bajos contenidos de limos y arcillas (Colandini et al. 1995; Legret 2001). Legret (2001) divide a las partículas que bloquean las superficies permeables en dos tipos:

- Partículas colmatantes primarias. Sedimentos de carácter mineral procedentes de los vehículos y de la erosión.

- Partículas colmatantes secundarias. Sedimentos más finos que los anteriores compuestos de materia orgánica, basuras, arcilla, etc., los cuales modifican su comportamiento en presencia de agua.

#### 2.1.4 FUNCIONES Y APLICACIONES

Antes de analizar las posibles aplicaciones de los firmes permeables, es importante resaltar cuales son las principales funciones de esta técnica de drenaje sostenible (Coupe et al. 2006; Haselbach et al. 2006; Scholz and Grabowiecki 2009):

- **Captación e infiltración.** Captación del agua de lluvia mediante la capa superior del pavimento permeable (superficie permeable) con el fin de reducir los riesgos de inundación.
- **Depuración.** Depuración y mejora de la calidad del agua de lluvia y de la escorrentía superficial infiltrada a través de todas las capas del firme permeable mediante la reducción de las sustancias contaminantes.
- **Almacenamiento.** Se usa la sub-base para almacenar el agua infiltrada a través de las capas superiores del firme permeable con el fin de utilizarla posteriormente. Para ello se impermeabiliza la parte inferior de la sub-base de forma que se evita la infiltración del agua almacenada hacia el terreno natural.
- **Infiltración al terreno.** Posible recarga de acuíferos situados en las cercanías del firme permeable, constituyendo un almacenamiento natural del agua, cerrando el ciclo interrumpido por la impermeabilización del terreno en las zonas urbanizadas. En este caso, la calidad del agua deberá ser contrastada cumpliendo con las normativas de aplicación en cada lugar. Suele disponerse otra capa de geotextil de filtración en el fondo para aumentar la capacidad de depuración.

Otras funciones indirectas o adicionales de los pavimentos permeables son las siguientes:

- **Evitar la erosión del suelo y estabilizar taludes.** Esta última función es quizá la menos conocida de todas. Se trata de una función que se consigue de forma indirecta. Esto es debido a la reducción de la escorrentía superficial por la captación y posterior infiltración al terreno natural, la cual evita los fenómenos de erosión del terreno. De esta misma manera ayuda

a la estabilidad de los taludes (Forsberg et al. 2005).

- **Utilización del agua de lluvia.** Uso para riego de parques y jardines, y baldeo de calles. Incluso, investigaciones llevadas a cabo en los últimos tiempos por Nnadi et al. (2014b) están analizando el potencial uso del agua de lluvia almacenada en los firmes permeables para el riego de suelos y plantas.
- **Valorización energética del agua de lluvia.** Esta última función del firme permeable es una de las más novedosas, y consiste en la reutilización del agua infiltrada y almacenada en el firme permeable
- **Reducción de la temperatura en las ciudades.** Mitigación del efecto de la isla de calor (Haselbach et al. 2011; Santamouris 2013).

Algunos autores como Scholz y Grabowiecki (2009) señalaron que las aplicaciones más importantes de un firme permeable son las siguientes:

- Accesos para vehículos: carreteras de zonas residenciales y de acceso a áreas de servicio.
- Estabilidad de taludes y control de la erosión.
- Zonas recreativas. Instalaciones de los campos de golf (aparcamientos y caminos).
- Aparcamientos de vehículos ligeros y senderos.
- Calles peatonales.
- Carriles bici y ecuestres.
- Riego de terrenos.

Con todo, los firmes permeables pueden adecuarse a una amplia variedad de tráficos asociados a superficies con usos residenciales, comerciales e incluso industriales (Imran et al. 2013), por lo que sus posibles aplicaciones son prácticamente ilimitadas.

### 2.1.5 INVESTIGACIONES LLEVADAS A CABO

Con el fin de conocer la evolución de la investigación llevada a cabo en el campo de los firmes permeables, se ha realizado un análisis del número de artículos científicos publicados en revistas indexadas en el “Journal Citation Report” (JCR) y de contribuciones a congresos y conferencias en los casos en que los “Proceedings” son publicados e



indexados. Además, se ha limitado el análisis a publicaciones en inglés. Se toman este tipo de publicaciones como indicador de calidad de los resultados directos de las investigaciones realizadas. De esta manera, se puede analizar la evolución de las investigaciones durante las tres últimas décadas a nivel mundial en el área de los firmes permeables. Para este fin se eligieron las bases de datos “Scopus”, “Web of Knowledge”, “Engineering Village” y “Google Academic” por ser las más utilizadas por investigadores de todo el mundo y por cumplir con los criterios sobre las publicaciones marcados con anterioridad. Por lo tanto, quedarán excluidos de este análisis los manuales, las guías de buena práctica, los libros, las publicaciones en revistas no indexadas y los congresos o conferencias cuyos “Proceedings” no hayan sido publicados e indexados con posterioridad.

En una primera fase, se llevaron a cabo varias búsquedas con diferentes palabras clave dentro de la base de datos “Scopus”. La primera bajo las palabras clave “pervious pavement”, mientras que para la segunda se utilizaron las siguientes palabras clave: “permeable paving”. Para el primero de los casos, el número de referencias encontradas fue de 255, mientras que para el segundo fue de 87. No obstante, muchas de las referencias encontradas en el segundo caso ya habían sido encontradas en el primero.

A continuación, se seleccionaron un total de 228 publicaciones que cumplieron con todos los requisitos expuestos con anterioridad, las cuales pasaron a formar parte del estudio para identificar las principales tendencias de uso de superficies permeables durante los últimos 30 años.

Como primer resultado de este estudio de referencias se presenta la evolución creciente del número de publicaciones desde 1984 hasta la actualidad, tendencia mostrada en la Figura 4.

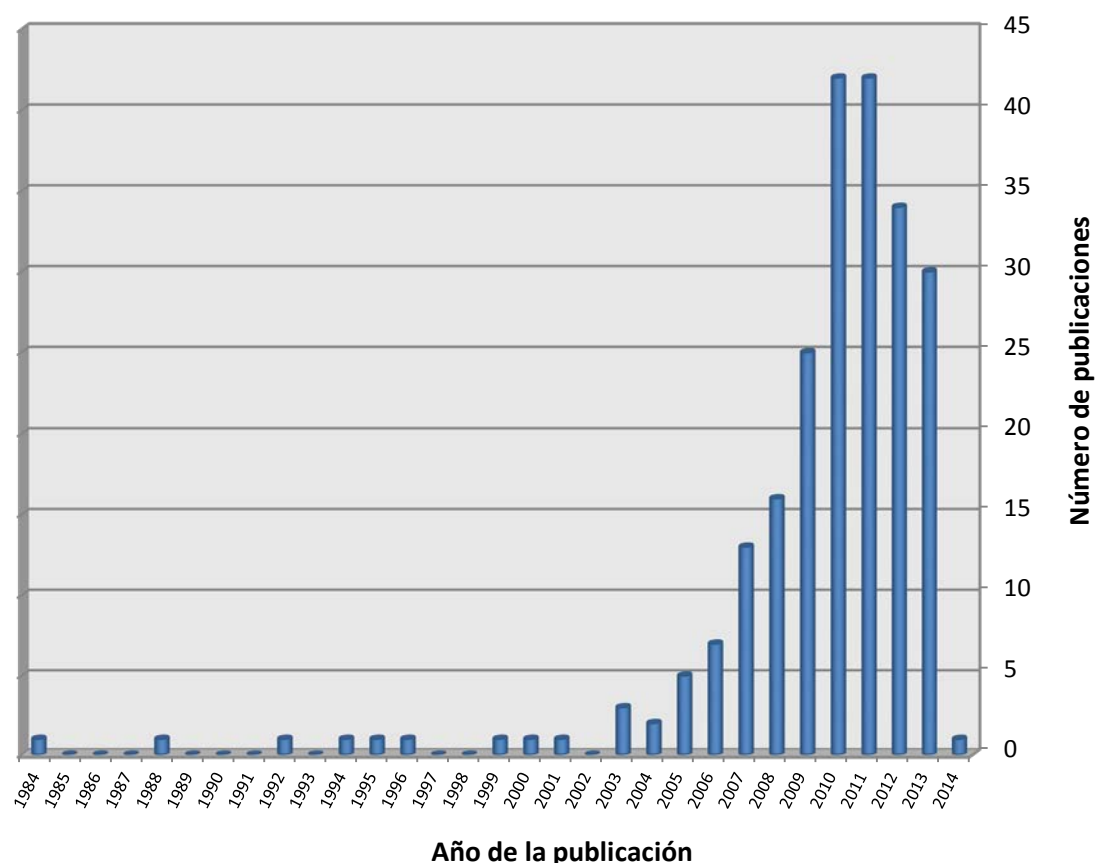
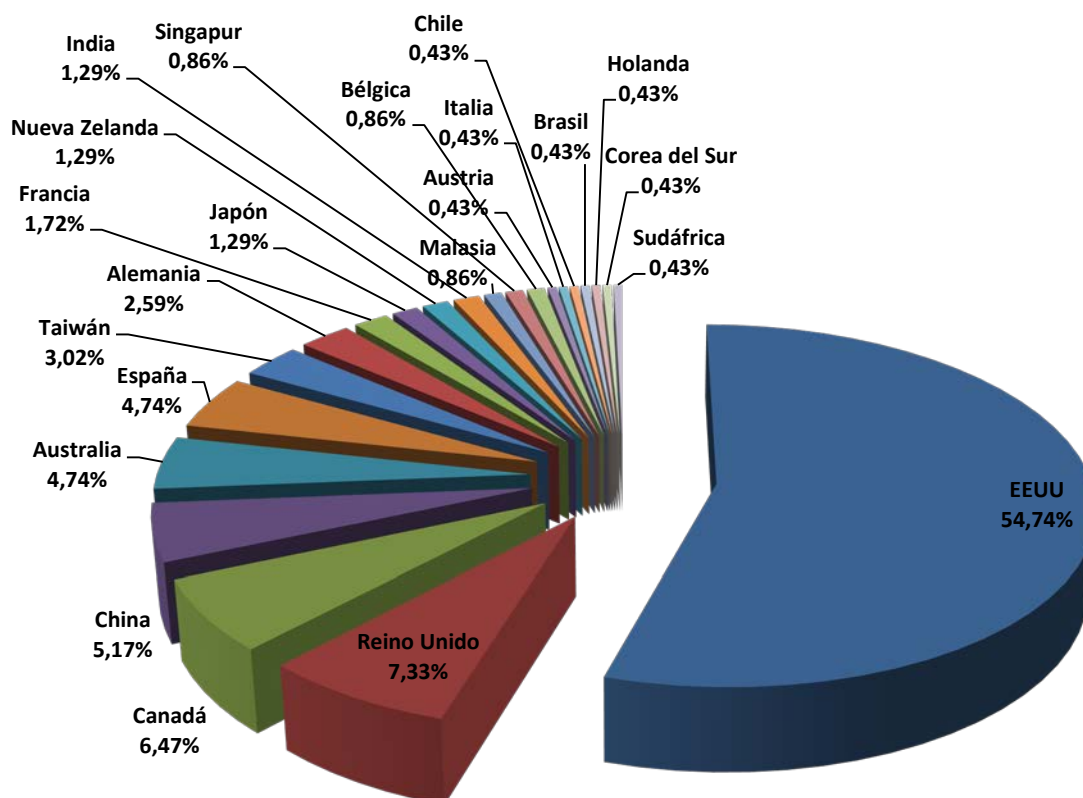


Figura 4. Evolución del número de publicaciones en función del año desde 1984 hasta 2014.

Si bien existen trabajos sobre firmes permeables entre los años 1984 y 2003, éstos son en su mayoría publicaciones del tipo recomendaciones, manuales de uso, libros, guías de buena práctica, etc., los cuales habían sido excluidos inicialmente del estudio como ya se explicó con anterioridad. De ahí el bajo número de publicaciones registradas en esas dos décadas de estudio (Figura 4), las cuales fueron sin embargo prolíficas en ese otro tipo de publicaciones, más divulgativas que científicas.

Es a partir del año 2003 cuando el número de artículos científicos aumenta de forma exponencial hasta alcanzar el máximo histórico de publicaciones hasta la fecha. Dicho máximo fue de 42 publicaciones anuales sobre el tema, alcanzado consecutivamente en los años 2010 y 2011. A partir de entonces la tendencia ha sido de un decrecimiento hasta las 33 publicaciones registradas en 2012 y las 30 registradas en 2013 (Figura 4).

Por países, la influencia de los Estados Unidos de América (EEUU) en las investigaciones a nivel mundial es manifiesta, con casi un 55% del total de las publicaciones (Figura 5). La diferencia con el resto de países es enorme, siendo el Reino Unido el siguiente en la lista con un 7,36%. Otros países como Canadá (6,49%), China (5,19%), Australia (4,76%) y España (4,33%), presentan un alto número de publicaciones, aportando investigaciones en una posición de relativa influencia regional en la temática de los firmes permeables.



**Fuente:** Elaboración propia tras el análisis de las 229 publicaciones sobre firmes permeables procedentes de la base de datos Scopus entre los años 1984 y 2014.

Figura 5. Porcentaje de publicaciones relacionadas con los firmes permeables divididas por países.

Si se combinan los criterios de año de publicación y país de origen, se obtienen varias tendencias entre las que destaca la evolución temporal del número de publicaciones de EEUU, mostrada en la Figura 6.

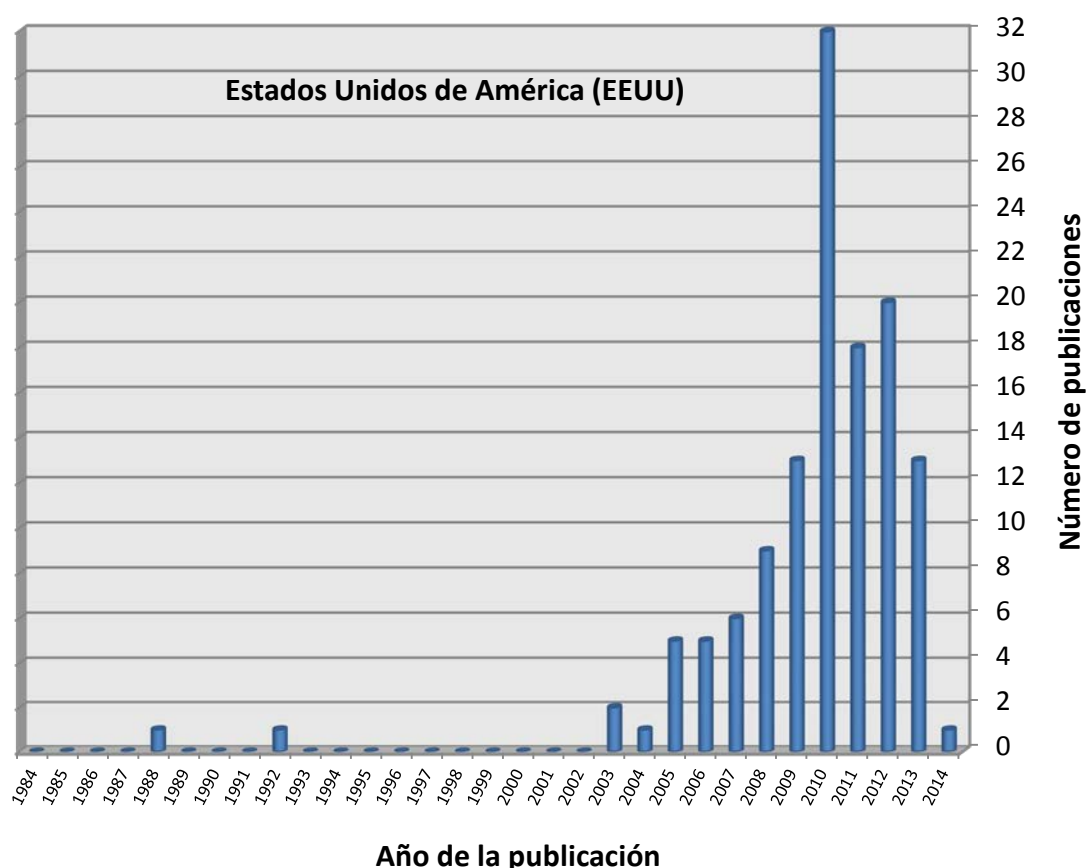


Figura 6. Evolución del número de publicaciones en EEUU desde 1984 hasta la actualidad.

La tendencia observada en Estados Unidos es muy similar a la observada a nivel mundial en la Figura 4. Este país alcanza su máximo de publicaciones en el año 2010 con un total de 32 (Figura 6), arrastrando al resto del mundo hacia el máximo marcado también durante ese año (Figura 4). En 2011 el número de publicaciones cae a casi la mitad quedándose en 18. Sin embargo, el fuerte crecimiento en el resto de países implicados en la investigación de los firmes permeables permite mantener el máximo histórico a nivel mundial alcanzado en el año 2010 (Figura 4). Gran parte de la tendencia estadounidense queda perfectamente explicada por la existencia de dos grandes congresos, cuyos “Proceedings” fueron publicados, dando lugar a un gran número de publicaciones. Estos congresos fueron los siguientes, patrocinados y posteriormente publicados por la American Society of Civil Engineers (ASCE) de EEUU en distintos números especiales de varias de sus revistas:

- 2010 International Low Impact Development Conference  
Redefining Water in the City. Conferencia celebrada en San Francisco (EEUU) en Abril de 2010.

- World Environmental and Water Resources Congress 2010: Challenges of Change. Congreso celebrado en Providence, Rhode Island (EEUU) en Mayo de 2010.

A partir de ese momento las publicaciones en EEUU decrecieron hasta el número de 13 en el año 2013, absorbiendo el resto de países esta caída en el número de publicaciones científicas sobre firmes permeables.

Como se comentó anteriormente, España ocupa la sexta posición en número de publicaciones en el campo de los firmes permeables. La Figura 7 muestra la evolución temporal de estas publicaciones y puede servir a modo de introducción al gran impacto de la investigación en la cual se enmarca esta tesis doctoral. En dicha figura puede observarse el claro avance experimentado por las publicaciones españolas, alcanzando su máximo durante el año 2013, coincidiendo las 3 publicaciones con artículos científicos asociados a esta tesis. Por lo tanto, puede afirmarse que el impacto positivo de este proyecto y por extensión de esta tesis en los resultados globales obtenidos por investigaciones españolas en firmes permeables es absoluto.

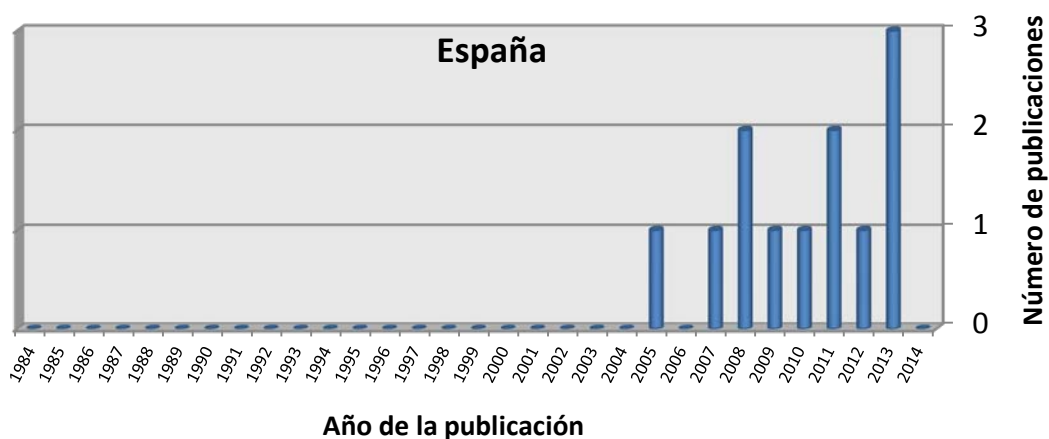
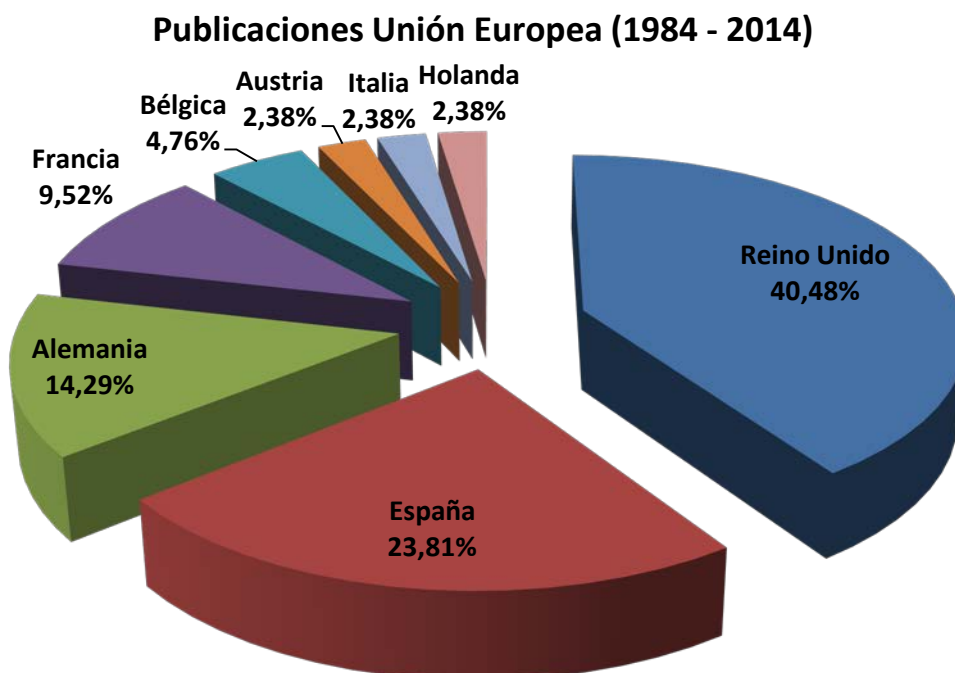


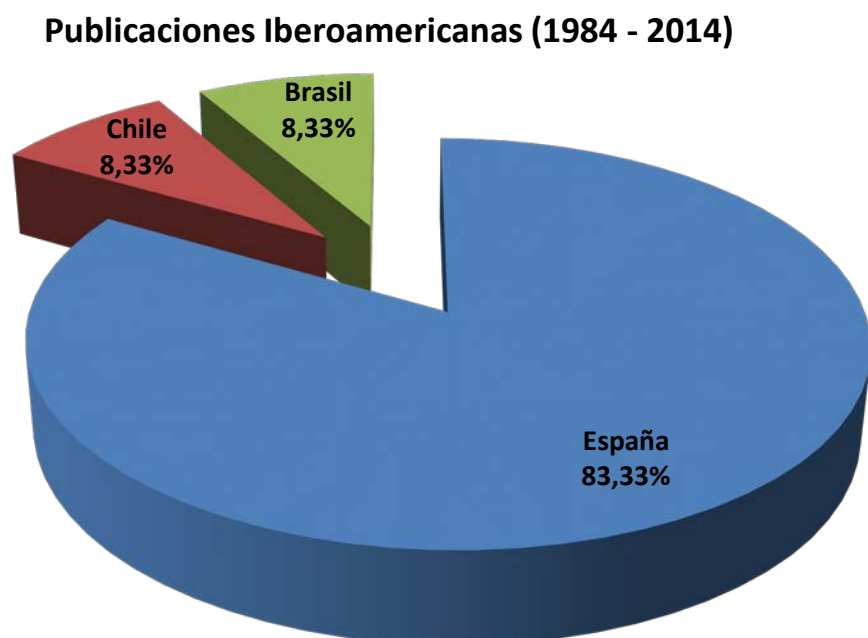
Figura 7. Evolución del número de publicaciones sobre firmes permeables en España.

A continuación, se amplía este análisis a las zonas del ámbito de influencia de España (Unión Europea e Iberoamérica) en el marco de los firmes permeables.



**Fuente:** Elaboración propia tras el análisis de las 229 publicaciones sobre firmes permeables procedentes de la base de datos Scopus entre los años 1984 y 2014.

Figura 8. Influencia de las investigaciones españolas en el global de la Unión Europea para el ámbito de los firmes permeables.

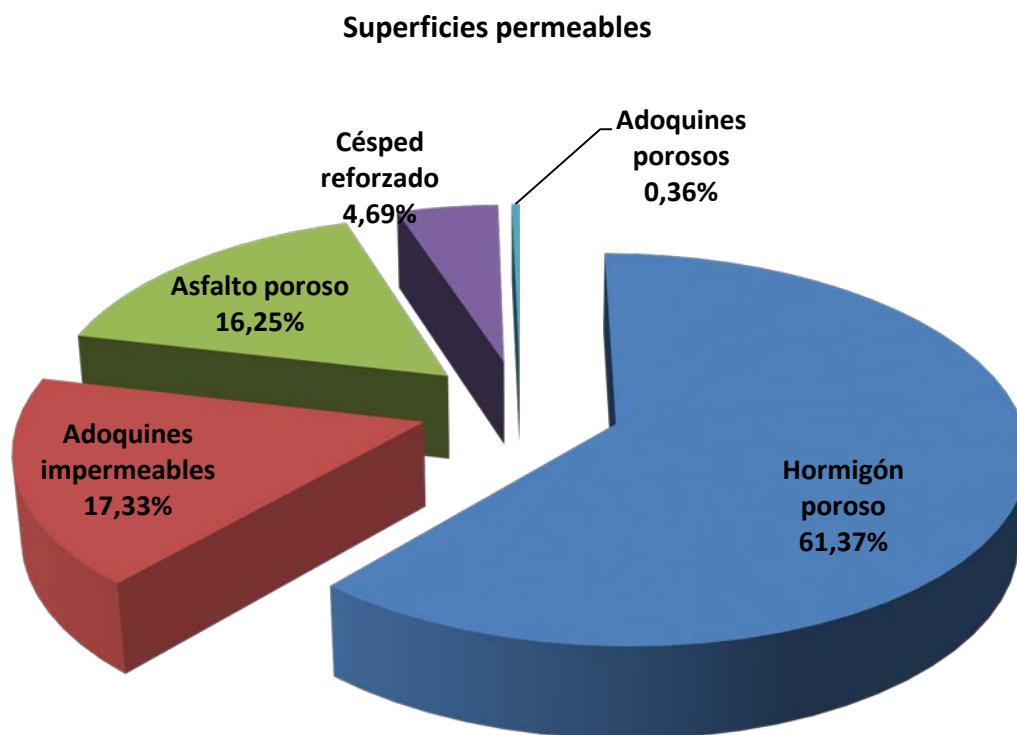


**Fuente:** Elaboración propia tras el análisis de las 229 publicaciones sobre firmes permeables procedentes de la base de datos Scopus entre los años 1984 y 2014.

Figura 9. Porcentaje del número de publicaciones Españolas en el total del área de Iberoamérica.

El impacto de las investigaciones con origen español es muy alto, alcanzando el 24% del total de la Unión Europea (Figura 8), y siendo aún mayor su influencia en las publicaciones iberoamericanas con un 83% (Figura 9).

La siguiente parte de este análisis consistió en la identificación de las superficies permeables más estudiadas a nivel mundial, así como la evolución de estos estudios en el tiempo. En la Figura 10 se aprecian las 5 superficies permeables estudiadas en las 229 publicaciones analizadas. Dichas superficies permeables son el hormigón poroso, los adoquines impermeables con ranuras, el asfalto poroso, el césped reforzado, tanto con celdas de hormigón como con celdas de plástico, y los adoquines porosos.



**Fuente:** Elaboración propia tras el análisis de las 229 publicaciones sobre firmes permeables procedentes de la base de datos Scopus entre los años 1984 y 2014.

Figura 10. Superficies permeables (mostradas en porcentaje respecto al total) utilizadas en las publicaciones sobre firmes permeables analizadas entre los años 1984 y 2014.

La Figura 10 muestra además como el hormigón poroso es la superficie permeable más ampliamente estudiada y probablemente utilizada en el mundo, centrando un 61,37% del total de estudios científicos analizados. Los adoquines impermeables con ranuras ocupan junto al asfalto poroso las dos siguientes posiciones de importancia con un 17,33% y un 16,25%, respectivamente (Figura 10). Entre estas tres superficies

permeables suman cerca de un 95% del total de publicaciones científicas analizadas sobre firmes permeables en los últimos 30 años. Por lo tanto, se desprende como principal conclusión de este estudio la importancia e interés del estudio de estas tres superficies permeables, siendo las de aglomerado poroso (hormigón poroso y asfalto poroso), las más estudiadas en investigaciones durante los últimos 30 años, con un 77,62% del total de publicaciones científicas analizadas (Figura 10).

A continuación, se puede observar en la Figura 11 la evolución de las investigaciones sobre las distintas superficies permeables a lo largo de los últimos 30 años.

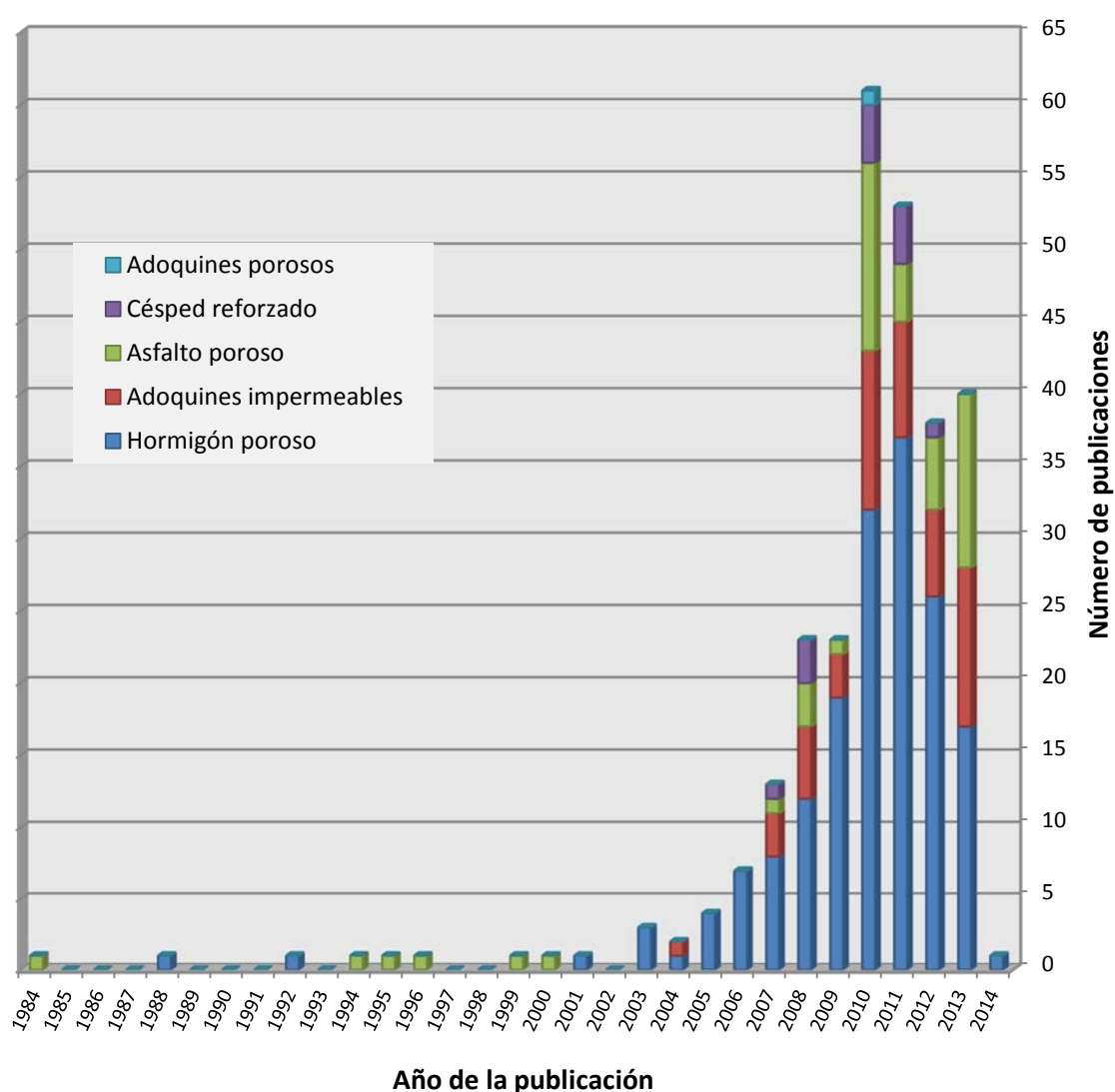


Figura 11. Evolución del número de publicaciones en las que aparece cada superficie permeable desde 1984 hasta 2014.



Si bien el hormigón poroso ha sido con diferencia la superficie más estudiada, se observa una tendencia de crecimiento de los adoquines impermeables con ranuras y del asfalto poroso en los últimos 5 años. Esta tendencia alcanza su máximo en el año 2013, sumando ambas superficies el 50% de las publicaciones estudiadas ese año (Figura 11).

En cuanto al césped reforzado, y a pesar de ser una superficie permeable ampliamente utilizada en aparcamientos permeables a nivel mundial dada su estética ecológica (Breinco blue future 2014), no ha sido estudiada al mismo nivel que las superficies de aglomerado poroso y de adoquines impermeables con ranuras.

Si se examina el uso del resto de capas de los firmes permeables, la capa de geotextil fue ampliamente utilizada en aquellas investigaciones en que se estudió el comportamiento o las propiedades mecánicas e hidráulicas de la estructura de un pavimento permeable o de un firme permeable. Sin embargo, en la mayoría de los casos solamente fue de interés el estudio de la capa de superficie permeable.

En todos los casos analizados en los que se estudió un pavimento o un firme permeable, se incluyó una capa de base granular, la cual no siempre estuvo separada de la capa de sub-base por un geotextil, aunque ya está ampliamente extendido su uso como capa de separación y filtro.

Finalmente, no se detectó un alto número de estudios sobre los materiales utilizados en la sub-base del firme permeable. No obstante, sí se observó que la utilización de materiales de tipo granular con un alto porcentaje de huecos, habitualmente entre un 30 y un 40%, está generalizada. El árido más utilizado fue de tipo calizo, existiendo alguna publicación sobre áridos reciclados, representando un porcentaje muy bajo de las superficies analizadas en este estudio.

A modo de reseña final de la importancia de los firmes permeables como técnica de drenaje urbano sostenible se analizó el número de publicaciones relacionadas con la temática SUDS y el número de ellas en las que se utilizaron firmes permeables. El resultado arrojó un porcentaje muy elevado de entre un 50 y un 60%.

## 2.2 INUNDACIONES

### 2.2.1 PERSPECTIVA GENERAL

Esta tesis está fundamentalmente orientada hacia el estudio del funcionamiento de un firme permeable desde un punto de vista hidráulico. Por lo tanto, las inundaciones son consideradas el problema de mayor calado a resolver mediante una correcta capacidad de infiltración de los firmes permeables. Smart y Henderson (1992), y Kolsky (1998) definieron las inundaciones como el factor más importante, externo a las decisiones del ingeniero de diseño, en la afección de la capacidad hidráulica de un sistema de drenaje. Así mismo definieron la frecuencia de las inundaciones como el parámetro de diseño más común en los sistemas de drenaje.

Sin una correcta gestión del agua de lluvia mediante sistemas de drenaje adecuados, el objetivo de reducir el volumen de escorrentía superficial en las superficies urbanas se ve claramente comprometido. Este hecho deriva en el aumento de la frecuencia y de la duración de los eventos de inundaciones, provocando problemas tan graves como los siguientes (Kolsky 1998):

- Daños a carreteras y edificios.
- Esparcimiento de contaminación fecal.
- Aumento del riesgo de accidentes, tanto de vehículos como de peatones.
- Creación de lugares de reproducción ideales para determinados vectores (insectos) que representan un riesgo para la salud.
- Pérdidas económicas y reducción de las actividades de comercio y transporte.
- Molestias provocadas por las actividades de limpieza de los desperfectos ocasionados por las inundaciones.

Uno de los informes de mayor relevancia redactados hasta la fecha en el ámbito europeo es el siguiente: “Floods in the WHO European Region. Health effects and their prevention” fruto de la colaboración entre la oficina europea de la “World Health Organization (WHO)” y la “Public Health England”. Dicho informe hace una amplia descripción de los mayores efectos que produce una inundación sobre la salud humana. Los principales efectos negativos son los mostrados a continuación:

- Mortalidad.

- Lesiones y exposición a sustancias químicas peligrosas.
- Infecciones y riesgo de epidemias.
- Efectos sobre la salud asociados con edificios y otras construcciones que se han visto inundadas.
- Agotamiento psicológico.
- Población vulnerable.
- Impacto en los servicios sanitarios.

Ahondando en los problemas más graves de mortalidad, este informe hace referencia a que en las últimas 3 décadas las inundaciones han provocado más de 200.000 muertes en el mundo y han afectado a 2800 millones de personas, siendo las dos terceras partes de estos decesos asociadas a muertes por ahogamiento, y el resto debidas a traumas psicológicos, ataques al corazón, electrocución, exposición al monóxido de carbono y fuego. Los datos de este estudio fueron obtenidos mediante el estudio de más de 15.000 referencias en Scopus al ser diseñado un algoritmo de búsqueda para dicho objetivo.

Ante todos estos problemas han sido varias las regiones del mundo que han implementado un plan para reducir las terribles consecuencias de las inundaciones (Vita et al. 2009). Entre ellos cabe destacar la “Flow Risk Directive” de 2007 en la Unión Europea (Directiva 2007/60/EC), la cual va asociada a la Directiva Marco del Agua (Directiva 2000/60/EC). Dicha directiva requiere que los países miembros de la Unión lleven a cabo una evaluación de los riesgos de inundación con sus consecuentes mapas de inundación y planes de gestión del riesgo asociado. Dicha directiva europea define el riesgo de inundación como la combinación de la probabilidad de un evento de inundación y las potenciales consecuencias adversas para la salud humana, el medio ambiente, la herencia cultural y la actividad económica. En el caso de España, este apartado de la directiva tiene su desarrollo en el Real Decreto 903/2010, de evaluación y gestión de riesgos de inundación.

Por otra parte, Huitema et al. (2009), y Junier y Mostert (2012) definieron los siguientes retos de investigación que según su criterio se desprenden de esta Directiva Europea, todos ellos referidos a las inundaciones:

- Medida de los riesgos.
- Mapas.

- Planes.
- Incertidumbres.
- Riesgos e incertidumbres en la comunicación.
- Confianza.
- Colaboración.
- Investigación interdisciplinar.
- Investigación participativa.

### 2.2.2 CURVAS INTENSIDAD-DURACIÓN-FRECUENCIA

Se ha asumido de forma general entre los ingenieros hidráulicos, como criterio de diseño de una estructura de drenaje, que la frecuencia de caudal punta de la escorrentía superficial se corresponde con la frecuencia de la intensidad de lluvia. Por lo tanto, y siguiendo esta asunción, se puede decir que una gráfica que representa la intensidad de lluvia en función del periodo de retorno y de la duración, podría convertirse mediante la utilización del método racional en una gráfica de la escorrentía superficial en función del periodo de retorno y de la duración del evento de lluvia (Kolsky 1998). Respecto a la transformación de intensidad de lluvia a caudal de escorrentía, hoy en día existen otras fórmulas utilizadas en el diseño de sistemas de drenaje además del método racional, si bien ésta sigue siendo la más ampliamente utilizada. Como reseña, destacar el método de Wallingford (modificación del método racional) por su amplia utilización en el cálculo de canales de drenaje urbano (Naqvi 2003).

De esta manera, la estimación de los caudales de diseño de una estructura de drenaje, y por lo tanto de los caudales punta a los que podría estar sometido también un firme permeable, se puede realizar apartir de las conocidas como curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF). A pesar de que en ocasiones se han utilizado valores fijos de la intensidad de lluvia, autores como Kolsky (1998) han señalado a las curvas IDF como el único método preciso para estimar las intensidades de lluvia causantes de los caudales punta de la escorrentía superficial. Además, al utilizar estas curvas se elimina la arbitrariedad de elegir una intensidad estándar que pueda no ser la más adecuada para el lugar de estudio en cuestión.

Con el objetivo de determinar los rangos de intensidades de lluvia extremos más comunes en el mundo, en esta tesis se ha llevabado a cabo un estudio de las curvas de

Intensidad-Duración-Frecuencia en distintas regiones del mundo. El objetivo ha sido cubrir distintas zonas climáticas con el fin de encontrar valores máximos de precipitaciones que se ajustasen a una duración de entre 15 y 30 minutos. Estas duraciones han sido fijadas para ser posteriormente utilizadas como duración de los eventos simulados en laboratorio.

Analizando los datos recogidos en este apartado y que se presentan a continuación, se puede identificar la gran diferencia existente entre los valores extremos de las precipitaciones entre Australia y la mayoría del resto de regiones geográficas a nivel mundial. Para mostrar esta diferencia, basta con tomar como referencia un evento de 15 minutos de duración para un periodo de retorno de 100 años. La Figura 12 muestra los valores de la ciudad australiana de Brisbane, con intensidades cercanas a los 2.000 mm/h, que contrastan con las intensidades correspondientes a la misma duración de evento de lluvia en la mayor parte de las ciudades estudiadas de Asia, África, América o Europa, con valores inferiores a los 400 mm/h.

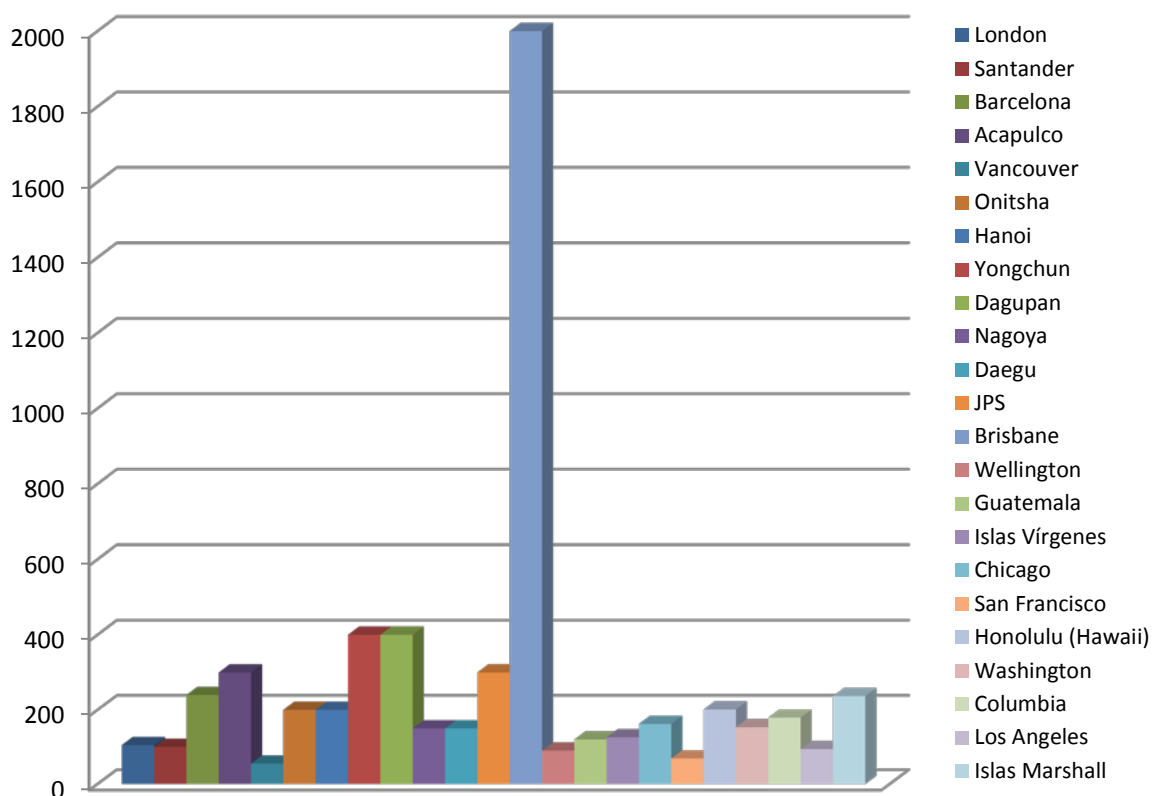


Figura 12. Valores de las intensidades registradas en 23 ciudades de todo el mundo para eventos de lluvia de 15 minutos de duración y 100 años de periodo de retorno.

Por lo tanto, y a la vista de esta primera apreciación, se decide dejar fuera del alcance de esta tesis la simulación de las lluvias correspondientes a las ciudades australianas, con el objetivo de fijar un rango de intensidades lo más estrecho posible, cubriendo el mayor número posible de ciudades del mundo.

A continuación, en la Figura 13 se muestran los cuatro grandes rangos de valores de las intensidades de lluvia en distintas regiones del mundo, tras haberse eliminado la influencia de las ciudades australianas. Los valores de la intensidad de lluvia que determinan los rangos de análisis son: 50, 100, 200 y 400 mm/h.

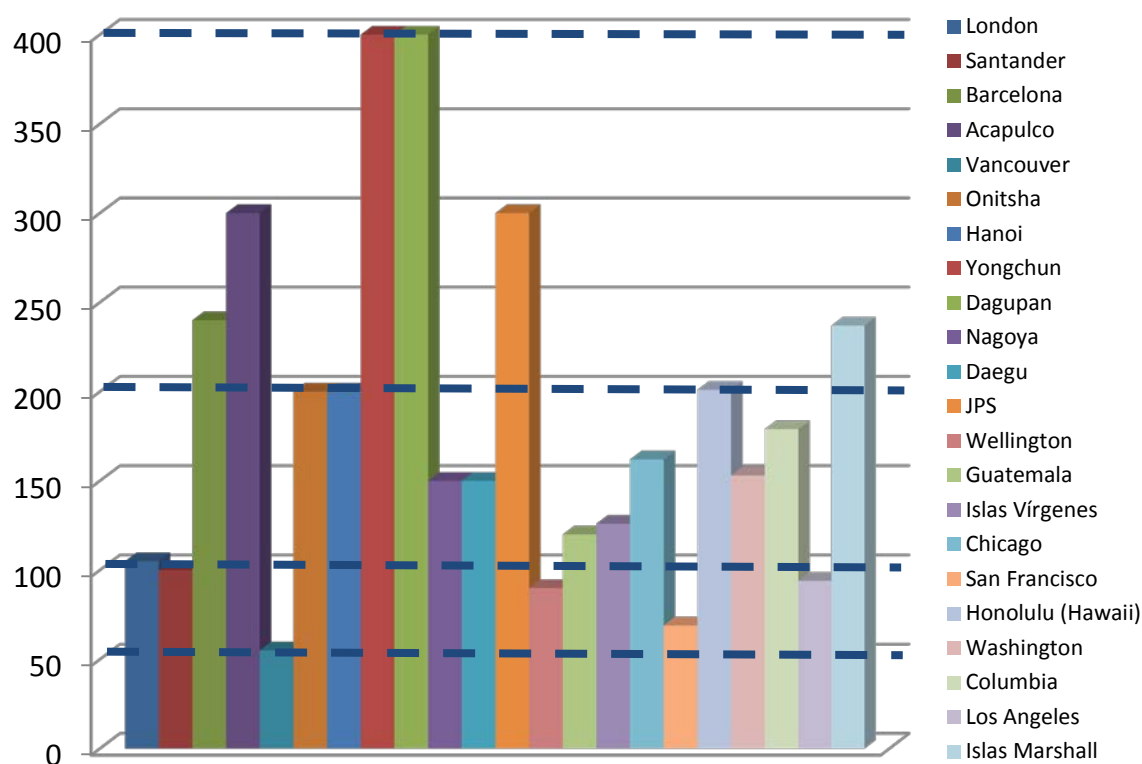


Figura 13. Valores de las intensidades registradas en 22 ciudades de todo el mundo para eventos de lluvia de 15 minutos de duración y 100 años de periodo de retorno.

Se encontraron valores próximos a los 50 mm/h de intensidad de lluvia para ciudades como Vancouver (Canadá) y San Francisco (EEUU) (NOOA 2014). Otras ciudades como Santander (España) (Cué Pérez et al. 2006), Londres (Reino Unido), Wellington (Nueva Zelanda) (UNESCO 2008), y Los Angeles (EEUU) (NOOA 2014) se encontraron muy cercanas a los 100 mm/h. Entre este valor y los 200 mm/h se identificaron ciudades como Chicago, Washington, Columbia, Islas Marshall y Honolulu en Estados Unidos (NOOA

2014), Onitsha (Nigeria) (Oyebande 1982), Hanoi (Vietnam) (UNESCO 2008), Nagoya (Japón) (UNESCO 2008), Daegu (Corea del Sur) (UNESCO 2008) y Ciudad de Guatemala (Guatemala) (INSIVUMEH 2014). Otras ciudades quedaron en un rango de entre 200 y 300 mm/h, como fueron los casos de Barcelona (España) (Casas Castillo 2005) y Acapulco (México) (Campos-Aranda 2010). Por último, las ciudades que presentaron unos mayores valores de la intensidad cercanos a los 400 mm/h fueron Yongchun (China) y Dagupan (Filipinas) (UNESCO 2008).

Estos valores de las intensidades de lluvia reflejados en la Figura 13 permitirán hacer una interpretación precisa y un análisis práctico de los resultados obtenidos en los ensayos para el análisis del comportamiento en infiltración de firmes permeables de esta tesis doctoral.

## 2.3 ESTUDIO DE LA INFILTRACIÓN DE AGUA EN UN FIRME PERMEABLE

Como se apuntó con anterioridad, la infiltración del agua de lluvia a través del firme permeable es la principal función de este tipo de técnicas de drenaje sostenible. Con el objetivo de ahondar en la comprensión de este fenómeno, se opta por analizar los dos parámetros fundamentales utilizados en las investigaciones llevadas a cabo por todo el mundo: las tasas de infiltración y la generación de escorrentía. Igualmente se estudian algunos de los instrumentos y ensayos utilizados para medir dichos parámetros.

### 2.3.1 PRINCIPALES VARIABLES

El funcionamiento de un firme permeable como elemento de captación e infiltración ha sido analizado mediante múltiples metodologías. Todo tipo de ensayos de laboratorio y de campo se han desarrollado durante décadas con este objetivo, estando algunos de ellos normalizados, y siendo otros de tipo experimental, en función de la investigación llevada a cabo y el objetivo para el cual fueron explícitamente diseñados.

El caudal efluente o hidrograma de descarga ha sido la variable más utilizada, tanto para analizar los volúmenes de escorrentía superficial generados por un evento de lluvia determinado como para analizar el funcionamiento de los distintos sistemas de drenaje ante dicha intensidad de lluvia. Siguiendo esta tendencia, en esta tesis se empleará dicha variable de medida para el análisis del comportamiento de un firme permeable como sistema de drenaje sostenible.

Las tasas de infiltración, calculadas a partir del volumen del efluente, son el parámetro más importante en la medición del comportamiento en infiltración de un firme permeable (Gilbert and Clausen 2006). No solamente es utilizado este parámetro en firmes permeables, sino que el estudio de suelos y de aporte de sedimentos requiere de dicho parámetro como elemento fundamental (Rostagno 1989). Otro posible uso de las tasas de infiltración es la identificación de daños estructurales en un pavimento impermeable mediante la combinación de dichos valores y del uso de técnicas de radar (Benedetto and Pensa 2007).

Pero sin duda el uso más extendido de este parámetro ha sido el análisis de la pérdida de capacidad de infiltración de firmes permeables debida a la colmatación por



adición de sedimentos sobre la superficie. Dicho análisis ha sido llevado a cabo mediante el uso de permeámetros e infiltrómetros tanto en laboratorio como en campo. Prueba de ello son los estudios llevados a cabo en laboratorio por Andersen et al. (1999), Tan et al. (2000), Davies et al. (2002), Hasselbach et al. (2006), González-Angullo (2008), Shuster et al. (2008), Hassani et al. (2010), Rodríguez-Hernández et al. (2012), Nnadi et al. (2012), Jung y Kim (2012), Hamzah et al. (2013), Sañudo-Fontaneda et al. (2013), Sañudo-Fontaneda et al. (2014b); y en campo por Ogden (1997), Schlüter y Jefferies (2002), Bean et al. (Bean et al. 2004), Ilgen et al. (2007), Fernández-Barrera et al. (2008), Earles et al. (2008), Delatte et al. (2009), Houle et al. (2009), Henderson et al. (2009), Chopra et al. (2010), Fassman y Blackbourn (2010), Dougherty et al. (2011), Lucke y Beecham (2011a), Shu et al. (2011), Smith et al. (2012) y Smith et al. (2013).

La utilización de las tasas de infiltración se ha visto complementada por su inclusión en distintos tipos de formulaciones que tienen su origen en el estudio de la infiltración en suelos. La forma más generalizada de analizar el flujo de agua en suelos ha sido trasladada por tanto al análisis de los firmes permeables en las últimas décadas. Dicho análisis tiene su base en las fórmulas utilizadas para suelos saturados y no saturados. A continuación se hace un breve repaso de la evolución de estas fórmulas y de su transición hacia la aplicación en superficies y firmes permeables.

El origen de todas las teorías se encuentra en la Ley de Darcy publicada en 1856 basada en sus experimentos sobre el flujo de agua que pasaba a través de una columna de arena. Estos experimentos demostraron que el caudal era directamente proporcional a la diferencia de altura de agua que causaba un flujo a través de una determinada área de la columna de arena, e inversamente proporcional a su longitud. Esta fórmula además introdujo el concepto de conductividad hidráulica, usualmente asimilado con el concepto de capacidad de infiltración en los firmes permeables. Como apuntó Klute (1986) existen diferentes métodos para determinar la conductividad hidráulica, dividiéndose fundamentalmente entre métodos de laboratorio, que tratan de simular el experimento de Darcy, y ensayos de campo, que suelen utilizar permeámetros basados en el tiempo que necesita una columna de agua para infiltrar en un determinado material (Smart and Herbertson 1992).

En 1931 Richard propuso la ecuación que a partir de entonces llevó su nombre, y que continúa siendo de aplicación para suelos no saturados. Dicha ecuación tiene en

cuenta el contenido de humedad del suelo para la obtención de la conductividad hidráulica.

Desde 1975 existen artículos en revistas indexadas en el JCR relativos al estudio de las tasas de infiltración en firmes permeables. De todos los artículos consultados durante la elaboración de esta tesis doctoral, al menos 124 trataron este tipo de parámetro hidráulico de infiltración.

Además, la mayoría de los estudios analizados para esta tesis estuvieron focalizados en el análisis de la pérdida de capacidad de infiltración en función de la colmatación, tanto en laboratorio como en campo. La colmatación es sin duda el inconveniente de los firmes permeables más estudiado.

Un ejemplo sobresaliente de la combinación de tasas de infiltración e influencia de la colmatación, para un análisis más completo del comportamiento de los firmes permeables, es el estudio de Boogaard et al. (2014). En este estudio se analizan 55 experiencias en Holanda y Australia mediante la obtención de las tasas de infiltración en cada uno de los firmes permeables ante dos tipos de intensidades de lluvia, permitiendo su intercomparación.

### **2.3.2 INSTRUMENTOS Y ENSAYOS**

En este punto se muestran las 25 referencias más actuales sobre distintos tipos de infiltrómetros y permeámetros utilizados en todo el mundo para caracterizar las tasas de infiltración y/o la generación de escorrentía en firmes permeables, tanto en laboratorio como en campo (Tabla 2). Para ello conviene recordar que se utilizaron las bases de datos “Scopus”, “Web of Knowledge”, “Engineering Village” y “Google Académico”, seleccionando únicamente aquellas publicaciones escritas en inglés.

Tabla 2. Instrumentos utilizados en las investigaciones llevadas a cabo en las últimas décadas sobre distintas superficies permeables.

<b>Autores</b>	<b>País</b>	<b>Instrumento</b>	<b>Superficie permeable analizada</b>
Nnadi et al. (2014a)	Reino Unido	Portable Laboratory Rainmaker (PLR) y aportación directa de agua	Adoquines impermeables con ranuras
Sañudo-Fontaneda et al. (2014a)	España	Infiltrómetro Cántabro Fijo (ICF) y permeámetro LCS	Adoquines impermeables con ranuras
			Hormigón poroso
			Asfalto poroso
Sañudo-Fontaneda et al. (2014b)	España	Infiltrómetro Cántabro Fijo (ICF)	Hormigón poroso
			Asfalto poroso
Sañudo-Fontaneda et al. (2013)	España	Infiltrómetro Cántabro Fijo (ICF)	Adoquines impermeables con ranuras
Al-Rubaei et al. (2013)	Suecia	Double-ring infiltrometer	Asfalto poroso
Lin et al. (2013)	Taiwán	Rainfall simulation device	Asfalto poroso
Li et al. (2013)	EEUU	ASTM method 1701-C y Simulated field rainfall	Asfalto poroso
Hamzah et al. (2013)	Malasia	Water flow simulator for laboratory	Asfalto poroso
Hamzah et al. (2012)	Malasia	Water flow simulator for laboratory	Asfalto poroso
Rodriguez-Hernandez et al. (2012)	España	Infiltrómetro Cántabro Fijo (ICF) – Cantabrian Fixed Infiltrometer (CFI)	Asfalto poroso
Nnadi et al. (2012)	Reino Unido	Test rig to simulate high rainfall events	Adoquines impermeables con ranuras
Smith et al. (2012)	EEUU	Single ring infiltrometer ASTM C1701	Adoquines impermeables con ranuras
			Asfalto poroso
			Hormigón poroso
Jung y Kim (2012)	Corea del Sur	Rainmaker simulator	Adoquines impermeables con ranuras

Lucke y Beecham (2011a)	Australia	Double ring infiltrometer	Adoquines impermeables con ranuras
Dougherty et al. (2011)	EEUU	Quick Field Infiltration Test (QFIT) y Modified double ring infiltrometer (MDRIT)	Hormigón poroso
Pappas y Huang (2010)	EEUU	Cascade soil box apparatus	Adoquines impermeables con ranuras
Hassani et al. (2010)	Irán	Infiltration meter apparatus	Adoquines impermeables con ranuras
Chopra et al. (2010)	EEUU	Embedded ring infiltrometer	Hormigón poroso
Pandit y Heck (2009)	Australia	Water distribution system	Hormigón poroso
			Asfalto poroso
Fernández-Barrera et al. (2008)	España	Infiltrómetro Cántabro Portátil (ICP) y Permeámetro LCS	Hormigón poroso
			Asfalto poroso
Angullo-Gonzalez (2008)	España	Infiltrómetro Cántabro Fijo (ICF) – Cantabrian Fixed Infiltrometer (CFI)	Adoquines impermeables con ranuras
Castro et al. (2007)	España	Infiltrómetro Cántabro Fijo (ICF) – Cantabrian Fixed Infiltrometer (CFI)	Adoquines impermeables con ranuras
Montes y Haselbach (2006)	EEUU	Falling head permeameter	Hormigón poroso
Davies et al. (2002)	Reino Unido	Infiltrómetro de la Universidad de Coventry - Infiltrometer	Adoquines impermeables con ranuras
Andersen et al. (1999)	Reino Unido	Rainfall simulator for laboratory	Adoquines impermeables con ranuras

De entre los instrumentos más utilizados, el Infiltrómetro Cántabro Fijo (ICF) ha sido el más utilizado en laboratorio hasta la fecha. Este aparato, con una serie de modificaciones detalladas más en profundidad en el capítulo de metodología de este documento, ha sido el elegido para ser utilizado en esta tesis. Mientras, de entre los

instrumentos empleados en campo, han destacado por su amplio uso el permeámetro LCS de la Universidad de Cantabria, normalizado a nivel nacional (NLT-327/00 2000) y europeo (EN 12697-40 2013) y el infiltrómetro de anillo empleado en la norma ASTM de Estados Unidos (ASTM C1701 2009), eligiéndose el primero para su uso en esta tesis al contarse con el asesoramiento directo del Laboratorio de Caminos de Santander (LCS).



## CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL





### 3.1 MATERIALES DE LAS SECCIONES DE FIRMES PERMEABLES UTILIZADAS

Los materiales utilizados en las secciones de firmes permeables utilizadas se dividieron en dos grandes grupos. Por un lado se describen los criterios de selección de los materiales a utilizar en los ensayos de laboratorio, así como los materiales finalmente utilizados. Por último, un punto final dentro de este apartado se utiliza para citar los materiales que fueron seleccionados y utilizados en las secciones de firmes permeables del aparcamiento de “Las Llamas” de Santander, y cuya ejecución se realizó varios años antes del comienzo de esta tesis doctoral.

#### 3.1.1 SELECCIÓN DE SECCIONES DE FIRMES PERMEABLES

Los criterios para la selección de los materiales utilizados en las distintas capas de las secciones permeables fueron los siguientes:

- Grado de interés. Las superficies permeables de hormigón poroso, adoquines con ranuras y asfalto poroso son las superficies más ampliamente estudiadas a nivel mundial, centrando el 95% de las investigaciones llevadas a cabo en los últimos 30 años.
- Tipo de árido de base más utilizado. El árido de base más utilizado en Cantabria es el árido calizo al cual se le quitaron los finos para obtener la permeabilidad necesaria.
- Presencia o no de la capa de geotextil. La presencia del geotextil ha demostrado tener una gran influencia en la reducción de contaminantes presentes en la escorrentía superficial, aumentando ligeramente el tiempo que necesita una gota de agua para infiltrar a través de la estructura completa de un firme permeable. Por lo tanto, y dadas todas las referencias analizadas se decidió incluir una capa de geotextil entre las capas granulares de base y sub-base. Igualmente se decidió estudiar de forma inicial el comportamiento de un nuevo producto denominado OASIS®, que potencialmente podría complementar o sustituir al geotextil en la estructura de un firme permeable, siendo este el principal material innovador analizado en esta tesis.
- Material de sub-base más utilizado. Al igual que en el caso de la base, los áridos más utilizados son los calizos, habiendo sido empleados en España para la construcción de firmes permeables con la granulometría

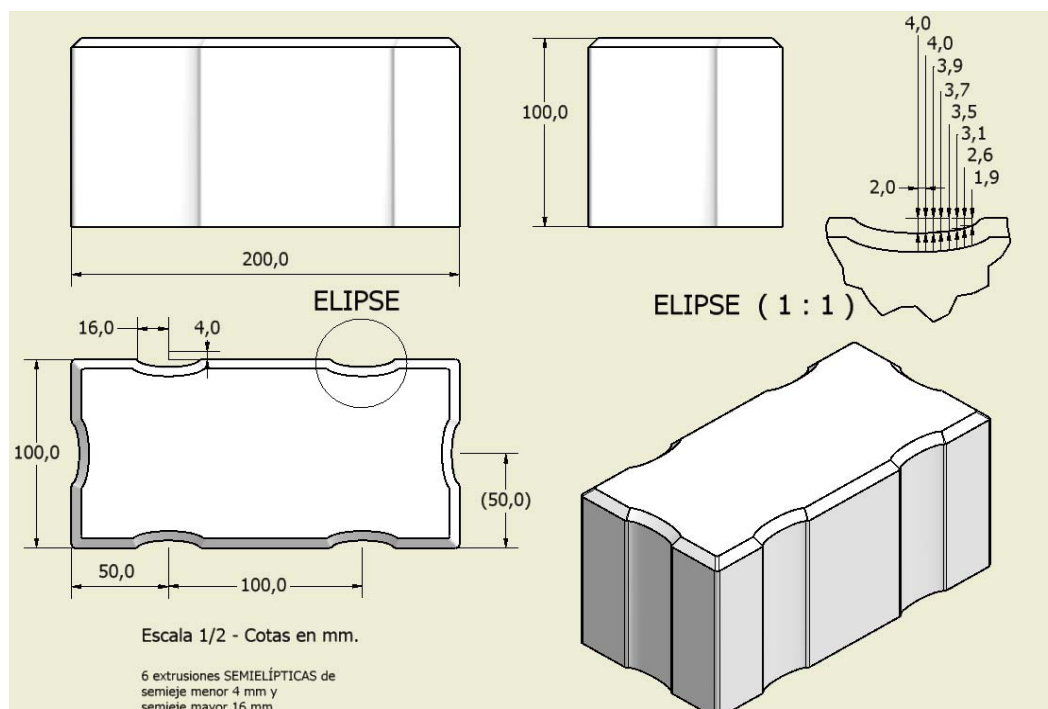
correspondiente a una zahorra drenante (ZAD-20), recogida en el PG-3.

### 3.1.2 SUPERFICIES PERMEABLES

#### 3.1.2.1 Adoquines con ranuras

Como adoquín con ranuras se entiende un adoquín de hormigón impermeable con una geometría que permite su disposición permeable. El adoquín con ranuras seleccionado para los trabajos realizados en laboratorio en la Universidad de Cantabria para el desarrollo de esta tesis fue el fabricado y comercializado por la empresa cántabra Bloques Monserrat S.L. Este adoquín corresponde con el diseño industrial con número de solicitud D0502335-1, el cual fue fruto de una investigación anterior llevada a cabo por el Grupo de Investigación de Tecnología de la Construcción (GITECO) de la Universidad de Cantabria en colaboración con la empresa anteriormente citada.

La geometría del adoquín puede verse en la Figura 14 siendo su largo de 200 mm, y su ancho y su alto de 100 mm, mientras que las ranuras con forma elíptica presentan las siguientes medidas, siendo su longitud de eje mayor de 32 mm y su longitud de eje menor de 8 mm.



Las principales características técnicas del adoquín con ranuras de Bloques Monserrat S.L. son las siguientes, tal y como refleja Rodríguez-Hernández (2008):

- Área de infiltración de cada adoquín de 6 cm<sup>2</sup> representada por el área de huecos de cada adoquín (6 ranuras elípticas). Esta superficie corresponde al 3% de la superficie total en planta del adoquín bajo la hipótesis de que éste fuese perfectamente rectangular.
- Peso de cada adoquín de 4,5 kg.
- Resistencia a la rotura mayor o igual a 3,6 MPa.
- Carga de rotura por unidad de longitud mayor o igual que 250 N/mm<sup>2</sup>.

Además, otro tipo de adoquín impermeable con ranuras fue utilizado en los estudios llevados a cabo en laboratorio en la Universidad de Coventry. Dicho adoquín es el denominado AQUAFLOW block® en color natural de la empresa FORMPAVE del Reino Unido, el cual tenía un largo de 200 mm, un ancho de 100mm y un espesor de 80 mm.

### 3.1.2.2 Hormigón poroso

Las principales características del hormigón poroso reforzado con polímeros utilizado en esta tesis, tanto en los ensayos de laboratorio como en los ensayos de campo, fueron las siguientes:

- Resistencia a la compresión de 18 y 27 MPa después de 7 y 28 días respectivamente, obtenidos de la aplicación de las Normativas Europeas UNE-EN 12390-1 (2012), UNE-EN 12390-2 (2009) y UNE-EN 12390-3 (2009) por parte de la empresa TRIAX tras ser encargado este estudio por la empresa SIEC, la cual se encargó de la ejecución del aparcamiento de “Las Llamas” en Santander.
- El porcentaje de huecos fue de un 25% con una densidad aparente de 1,778 Kg/m<sup>3</sup> según NLT-327/00 (2000).
- La dosificación del hormigón poroso reforzado con polímeros utilizado como superficie permeable fue la indicada en la Tabla 3 y está basada en anteriores estudios llevados a cabo por Aguado et al. (1997) y Pindado et al. (1999).

Tabla 3. Dosificación por m<sup>3</sup> del hormigón poroso reforzado con polímeros Pindado et al. (1999).

Tamaño de partículas (Kg)		Contenido de cemento tipo V-35 (Kg)	Contenido de agua (L)	Polímero utilizado	Contenido de polímeros (L)
0-5mm	5-12mm				
104	1456	260	40	Polímero acrílico puro	40

Además del hormigón poroso anteriormente citado se utilizó otro hormigón poroso conocido a nivel mundial como ECOCRETO en algunos de los ensayos llevados a cabo en laboratorio. Dicho material tiene las siguientes características (ECOCRETO 2011):

- Resistencia a la compresión (28 días): 150 kg/cm<sup>2</sup>.
- Resistencia a la flexión: 25 kg/cm<sup>2</sup>.
- Densidad aparente: 1,600-1,800 Kg/m<sup>3</sup>.

Tabla 4. Dosificación por m<sup>3</sup> del hormigón poroso ejecutado mediante el uso del aditivo ECOCRETO (ECOCRETO 2011).

Arena (Kg)	Grava de ¾" (m <sup>3</sup> )	Cemento (Kg)	Agua (L)	ECOCRETO (L)
50	1,15	240	70	8,5

### 3.1.2.3 Asfalto poroso

El asfalto poroso utilizado en los ensayos de laboratorio fue una mezcla bituminosa PA-16 según la actualización del Pliego de Preinscripciones Técnicas Generales para obras de carreteras y puentes (PG-3) (Ministerio de Fomento. Dirección General de Carreteras 2011) y fue aportado por la empresa constructora SENOR S.L. Se trata de una mezcla bituminosa drenante con un tamaño máximo del árido de 16 mm, expresado como la abertura del tamiz que deja pasar entre un noventa y un cien por cien (90% y 100%) del total del árido (Tabla 5).

Tabla 5. Granulometría del árido utilizado para la construcción de la mezcla bituminosa drenante PA-16 (Ministerio de Fomento. Dirección General de Carreteras 2011).

<b>Cernido acumulado para cada huso granulométrico (% en masa)</b>							
<b>Abertura de los tamices UNE (mm)</b>	<b>0,063</b>	<b>0,500</b>	<b>2,0</b>	<b>4,0</b>	<b>8,0</b>	<b>16,0</b>	<b>22,4</b>
<b>Rangos establecidos en el PG-3 (% en masa)</b>	3-6	5-12	10-17	13-27	40-60	90-100	100
<b>Datos probetas fabricadas (% en masa)</b>	4,3	8,0	13,0	19,0	50,0	94,0	100,0

El análisis granulométrico fue realizado por la empresa SENOR S.L. según la norma UNE-EN 933-1 (2012).

Ensayos realizados en esta tesis sobre el material con el Permeámetro Laboratorio Caminos Santander (LCS) según la Norma del Laboratorio de Transportes NLT-327/00 (2000), permitieron estimar el porcentaje de huecos de la mezcla drenante, que fue del 23,19%, y la densidad aparente, que fue de 2,050 Kg/m<sup>3</sup>. Comentar que la NLT-327/00 (2000) guarda gran similitud con la Norma Europea EN 12697-40 (2013).

### 3.1.3 BASE

Se utilizó como base un árido calizo sin finos de tamaño constante en el rango 4 – 6,3 mm, con un 50% de huecos y 1,354 g/cm<sup>3</sup> de densidad aparente, tanto en laboratorio como en campo. Este árido corresponde con el tipo de árido utilizado comúnmente por las empresas de adoquines con ranuras como capa de “arrocillo” o asiento bajo la superficie de adoquines. Esta base se utilizó también bajo las superficies de hormigón poroso y asfalto poroso con el objetivo de que las secciones de pavimentos permeables en laboratorio y firmes permeables en campo, únicamente difirieran en el tipo de superficie.

### 3.1.4 CAPA DE SEPARACIÓN Y FILTRO

#### 3.1.4.1 Geotextil

Se utilizó el mismo tipo de geotextil de filtro y separación en la totalidad de la investigación en laboratorio como parte de las secciones de pavimento permeable y de firme permeable, el cual fue suministrado por la empresa DANOSA, Derivados Asfálticos Normalizados S.A. Dicho geotextil es el DANOFELT PY 150, un geotextil no tejido, fabricado a base de fibra corta de poliéster, ligado mecánicamente mediante agujeteado sin aplicación de ligantes químicos, presiones o calor, y que presenta las siguientes características técnicas (Tabla 6).

Tabla 6. Características técnicas del geotextil DANOFELT PY 150 (DANOSA, 2013).

Masa media (g/m <sup>2</sup> ) UNE-EN 965	Permeabilidad al agua (m/s) UNE-EN ISO 11058	Resistencia a la tracción longitudinal (KN/m) UNE-EN ISO 10319	Resistencia a la tracción transversal (KN/m) UNE-EN ISO 10319	Espesor a 2 kPa (mm) UNE-EN 964	Medida de abertura (μm) UNE-EN ISO 12956
150 (+10%; -15%)	0,04468; -0,005	1,2; -0,3	1,2; -0,3	1,90 ± 0,20	100, ± 20

Este tipo de geotextil había demostrado en el curso de anteriores investigaciones (Rodríguez-Hernandez 2008) unas propiedades adecuadas para su uso en firmes permeables, fundamentalmente en cuanto a su alta permeabilidad perpendicular al plano (Tabla 6).

#### 3.1.4.2 OASIS®

Además del tipo de geotextil detallado anteriormente se introdujo en el estudio un nuevo material denominado OASIS® con número de patente WO2006077421A1 (Lowe 2006). Se trata de una espuma fenólica con estructura celular abierta fabricado a partir de resina de fenol formaldehído. Este material tiene una alta capacidad para absorber agua y sirve para retener microorganismos encargados de acabar con los contaminantes. Dicha capacidad de almacenar agua queda puesta de manifiesto en la descripción de la patente al apuntarse que se estima que cada gramo de este material es capaz de absorber entre 40 y 50 ml de agua. Se utilizaron dos espesores de 1,3 y 2,0 cm en los ensayos realizados con dicho material.

### 3.1.5 SUB-BASE

Se utilizó como capa granular de sub-base en todos los estudios realizados en España tanto en laboratorio como en campo un árido calizo cuya granulometría se presenta en la Tabla 7, cumpliendo con lo estipulado en el PG-3 (Bustos and Pérez 2007) para ser considerada una zahorra artificial drenante ZAD-20.

Tabla 7. Granulometría del árido calizo utilizado como sub-base de firmes permeables cumpliendo con los rangos de cernido acumulado establecidos en el PG-3 para una ZAD-20 (Bustos and Pérez 2007).

Árido calizo	Abertura de los tamices UNE (mm)								
	40	25	20	8	4	2	0,5	0,25	0,063
<b>Rangos del cernido acumulado establecidos para una ZAD-20 (PG-3) (% en masa)</b>	—	100	65-100	30-58	14-37	0-15	0-6	0-4	0-2
<b>Cernido acumulado utilizado (% en masa)</b>	—	100	65	30	14	—	—	—	—

En el caso del estudio llevado a cabo en el Reino Unido, la sub-base fue un árido calizo con un rango de tamaños entre 10 y 63 mm.

### 3.1.6 SECCIONES DE FIRME UTILIZADAS EN LOS ENSAYOS DE CAMPO

A continuación se procede a mencionar todos los materiales utilizados en las secciones de firmes permeables de las plazas de aparcamiento utilizadas en los ensayos de campo en “Las Llamas” y obtenidos a partir de los datos expuestos en el trabajo de Gómez-Ullate (2011).

Tabla 8. Características de las secciones de firme permeable analizadas mediante el permeámetro LCS en el aparcamiento experimental del Parque de “Las Llamas” en Santander (Gómez-Ullate 2011).

Capa de la sección de firme permeable	Tipo de superficie permeable	
	Asfalto poroso PA-12 según Bustos y Perez (2007)	Hormigón poroso reforzado con polímeros según Pin dado et al. (1999)
<b>Superficie permeable</b>	80 mm de espesor	80 mm de espesor
<b>Base</b>	5 cm de árido calizo sin finos de tamaño 4 – 6,3 mm.	
<b>Geotextil</b>	Polyfelt TS30 (4 plazas)	Polyfelt TS30 (4 plazas)
	Danofelt PY150 (4 plazas)	Danofelt PY150 (4 plazas)
	Sin geotextil (1 plaza)	Sin geotextil (1 plaza)
<b>Sub-base</b>	Clean limestone (350-370mm)	

El hecho de dividir la Tabla 8 en función de las superficies permeables utilizadas se debió a que la capa que determina los valores de la drenabilidad es la superficie permeable, al tratarse el permeámetro LCS de un dispositivo de análisis de la permeabilidad de una superficie de aglomerado poroso según la Norma UNE-EN 12697-40 (2013).

Tanto el geotextil como la capa de base y de sub-base utilizadas en el aparcamiento experimental de “Las Llamas” no tuvieron incidencia en los ensayos de campo, por medir éstos la drenabilidad de la superficie permeable.

Finalmente, cabe destacar que el asfalto poroso utilizado en el aparcamiento es ligeramente diferente al utilizado en laboratorio debido al cambio de normativa que se produjo en España con relación a este tipo de asfalto desde que el aparcamiento fue diseñado y ejecutado hasta el comienzo de esta tesis doctoral (Carreteros 2008). A consecuencia de ello, el asfalto utilizado en el aparcamiento fue una mezcla porosa PA-12, mientras que en laboratorio fue una mezcla porosa PA-16 con la modificación de la



normativa (Ministerio de Fomento. Dirección General de Carreteras 2011), la cual se consideró como la más cercana a la antigua PA-12 con el objetivo de poder comparar los resultados obtenidos en laboratorio y en campo.

## 3.2 ENSAYO DE MEDIDA DE LA CAPACIDAD DE INFILTRACIÓN DE UN PAVIMENTO PERMEABLE EN LABORATORIO

### 3.2.1 INFILTRÓMETRO CÁNTABRO FIJO (ICF)

El ensayo diseñado para la medida de las tasas de infiltración y de la capacidad de infiltración de una superficie permeable requirió de la modificación en el diseño y construcción del instrumento de laboratorio denominado Infiltrómetro Cántabro Fijo (ICF), el cual fue desarrollado en base a anteriores trabajos llevados a cabo en la Universidad de Coventry por Davies et al. (2002), y posteriores diseños realizados en la Universidad de Cantabria por parte de Rodríguez et al. (2005), Castro et al. (2007), y González-Angullo (2008).

El infiltrómetro diseñado por Davies et al. (2002) permitía simular la escorrentía superficial originada a partir de un evento de lluvia con una intensidad de lluvia determinada, llegando a la superficie permeable desde una superficie impermeable adyacente. Los posteriores trabajos de la Universidad de Cantabria citados anteriormente introdujeron dos modificaciones de gran interés. Por un lado, se añadió un sistema situado a 50 cm sobre la superficie de ensayo que permitió la simulación de la lluvia cayendo directamente sobre la superficie permeable. Por otro lado se modificó el emplazamiento del simulador de escorrentía superficial, desplazándolo desde su antigua posición junto a la superficie permeable y a su misma altura, hasta una nueva posición elevada, a una altura de 50 cm junto al simulador de lluvia directa, precipitando el agua de escorrentía sobre una rampa impermeable situada al comienzo de la superficie permeable.

El siguiente rediseño del ICF fue llevado a cabo por Sañudo-Fontaneda et al. (2010) para su uso en esta tesis doctoral, dando lugar a varias publicaciones que lo validaron como aparato de medida de las tasas de infiltración de una superficie permeable en la Universidad de Cantabria (Sañudo-Fontaneda et al, 2013a, b). Este nuevo diseño introduce las siguientes modificaciones y mejoras respecto a sus predecesores:

- **Uso de dos caudalímetros.** El sistema de mangueras que permite la llegada del agua a los simuladores de escorrentía superficial y de lluvia directa cuenta en este nuevo diseño con dos caudalímetros que sirven para el control preciso del flujo de agua. Un caudalímetro controla el caudal de

agua del simulador de lluvia directa, mientras que el segundo caudalímetro controla independientemente el caudal del simulador de escorrentía superficial. Con ello, el nuevo infiltrómetro permite simular eventos de lluvia con diferentes intensidades de lluvia y volúmenes de escorrentía, ajustados independientemente con mayor precisión que sus antecesores.

- **Mejora en la simulación de la escorrentía superficial.** En este nuevo diseño se optó por recuperar la posición inicial del simulador de escorrentía superficial propuesta por Davies et al. (2002), mejorando la salida del agua para minimizar las pérdidas por salpicaduras. Por tanto, se dispuso el tubo de forma adyacente a la superficie permeable a ensayar, simulando de manera más cercana la realidad de una escorrentía procedente de una superficie impermeable que vierta sobre la permeable. De esta forma se evitan también las posibles pérdidas de caudal de escorrentía que podrían darse debido al rebote de las gotas de lluvia cayendo sobre la superficie impermeable del anterior dispositivo, y que podrían modificar el caudal real de entrada de escorrentía superficial a la superficie permeable.
- **Apertura frontal en el marco de la probeta de pavimento permeable.** Se realizó un corte en el frontal de la caja de madera que contiene la estructura del pavimento permeable, sustituyendo esta parte del marco por un mallado de plástico y otro metálico, conteniendo el pavimento al mismo tiempo que se permitía el paso del agua. Con esta modificación se abre la posibilidad de estudiar la aparición de un flujo sub-superficial de agua dentro del pavimento permeable, debido a su inclinación del pavimento durante los ensayos.

El nuevo diseño del ICF permite realizar ensayos sobre cualquier tipo de pavimento permeable bajo los siguientes condicionantes de uso definidos en Sañudo-Fontaneda et al. (2013a, b):

- Probetas cuadradas de 0,5 metros de lado, resultando un área de la superficie permeable de ensayo de 0,25 m<sup>2</sup>.
- Rango de intensidades de lluvia simulada entre 10 y 150 mm/h.
- Rango de pendientes del pavimento permeable entre 0 y 10%.

Por todo ello, el nuevo diseño del ICF de la Universidad de Cantabria permite

obtener los valores de las tasas de infiltración y de la capacidad de infiltración de una superficie permeable en función de la pendiente de dicha superficie y de la intensidad de lluvia simulada.

Para una mejor comprensión del nuevo diseño del ICF, se presenta a continuación una descripción de las partes de dicho dispositivo de laboratorio siguiendo el esquema inicial de Rodríguez-Hernandez (2008) para el anterior diseño del ICF y de Sañudo-Fontaneda et al. (2010, 2012) para el diseño actual (Figura 15):

- **Bastidor con inclinación regulable.** Se trata del principal elemento de apoyo de la estructura del dispositivo de laboratorio, siendo el soporte fundamental de la estructura del pavimento permeable, y muy especialmente de la capa de superficie permeable. Este bastidor metálico permite lograr la simulación de distintas pendientes de la superficie permeable mediante dos tornillos situados a ambos lados del mismo.
- **Soporte superior.** Es una estructura metálica dispuesta a 50 cm sobre la superficie permeable de ensayo. Dicha estructura es la que sirve de soporte para el simulador de lluvia directa sobre la superficie permeable.
- **Marco de la probeta.** Estructura de madera que contendrá las tres capas que componen la estructura completa del pavimento permeable: superficie permeable de forma cuadrada con 50 cm de lado y 10 cm de profundidad, base de 5 cm de profundidad y geotextil de filtrado y separación del pavimento con respecto a la sub-base del firme permeable. Es en esta estructura donde reside una de las modificaciones practicadas al ICF y explicadas anteriormente. Se trata de la apertura frontal, en la que se sustituye la madera por una rejilla metálica y otra de plástico, además de la disposición del geotextil.
- **Estructura de metacrilato periférica.** Esta estructura permite recoger las gotas de lluvia que reboten sobre la superficie y salgan despedidas fuera de la superficie permeable, reduciendo de esta forma la pérdida del caudal de lluvia directa que pudiera producirse. La parte baja de esta estructura de metacrilato corresponde a una rampa que orienta el caudal de escorrentía superficial residual que queda al final de la superficie permeable hacia la cámara de recogida correspondiente.
- **Simulador de lluvia directa.** Este simulador permite ensayar intensidades

de lluvia cayendo directamente sobre la superficie permeable de ensayo, gracias a 5 líneas de goteros de caudal ajustable, con 15 goteros por línea (75 goteros en total). Estos goteros tienen las siguientes características a tener en cuenta:

- Diámetro de gota de lluvia: 3,5 mm.
- Rango del caudal ajustable: 0-40 l/h.
- **Simulador de escorrentía superficial.** Para poder simular la escorrentía superficial procedente de las zonas impermeables hacia la superficie permeable de estudio, se utilizó un tubo perforado de 20 mm de diámetro (6 perforaciones de 2 mm de diámetro cada una), dispuesto adyacente a la superficie permeable sobre una rampa impermeable.
- **Caudalímetros de control.** Se utilizaron dos caudalímetros de la marca SANT JUST DESVERN, modelo 2100. Estos dispositivos tienen como objetivo lograr el control de los caudales simulados tanto en la lluvia directa sobre la superficie permeable como en la escorrentía superficial, procedentes ambos de una intensidad de lluvia previamente determinada. El rango de estos caudalímetros está entre 2 l/h y 40 l/h, marcando el posterior rango de simulación de intensidades de lluvia del ICF.
- **Cámaras de recogida del agua del ensayo.** Un total de 7 cámaras de recogida se disponen a lo largo del ICF de la siguiente manera:
  - 5 cámaras para la recogida del agua infiltrada a través de las tres capas de pavimento permeable, las cuales permiten discretizar la recogida del agua infiltrada cada 10 cm a contar desde la parte superior de la superficie permeable (lado más cercano al tubo de simulación de la escorrentía superficial). Estas cámaras permiten cuantificar las tasas de infiltración del pavimento permeable estudiado.
  - 1 cámara para la recogida de la escorrentía superficial residual que queda al final de la superficie permeable (lado de la superficie más alejado del tubo de simulación de la escorrentía superficial) sin haberse infiltrado previamente a través de su superficie. Esta cámara permite cuantificar la capacidad de infiltración del pavimento permeable estudiado.
  - 1 cámara para la recogida del flujo de agua sub-superficial que se ha infiltrado a través de la superficie permeable, pero que no ha

terminado de infiltrarse completamente a través de las 3 capas que conforman la estructura del pavimento permeable, situado en la apertura frontal del marco de la probeta.

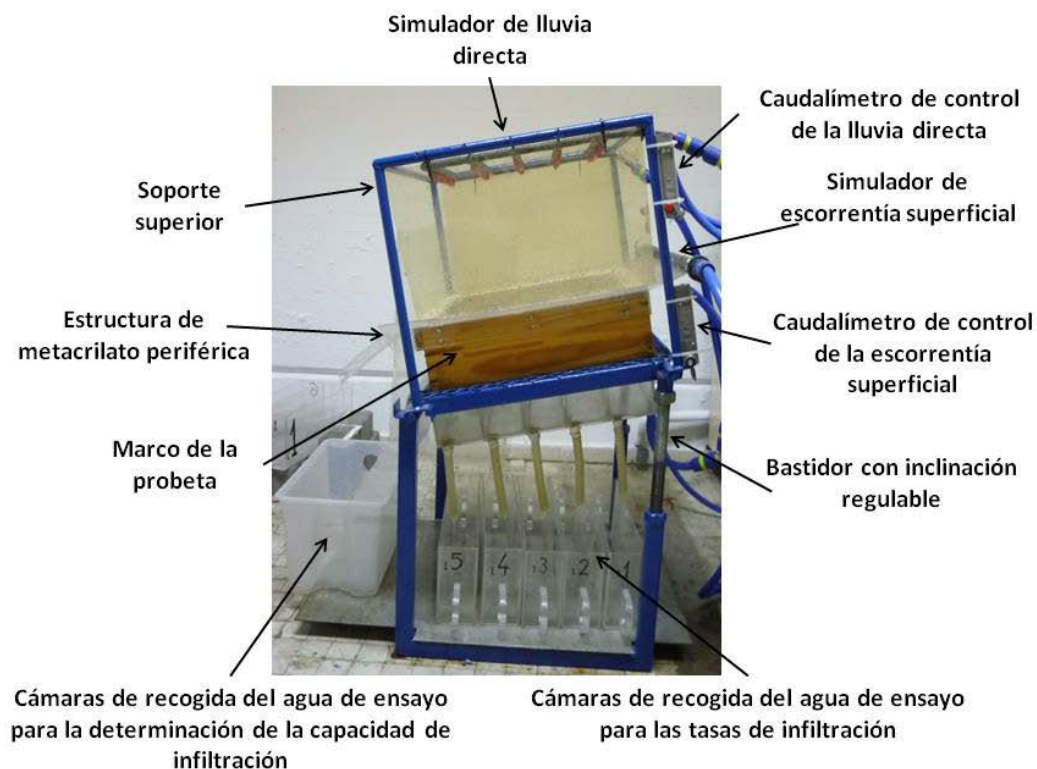


Figura 15. Esquema del nuevo diseño del ICF.

El proceso de renovación, modificación y montaje del nuevo diseño del ICF siguió las etapas descritas a continuación:

- **Fase 1.** Tratamiento antioxidante y posterior pintado de la estructura metálica del ICF. Se le dio un par de capas de antioxidante a toda la estructura metálica del ICF poniendo especial cuidado en aquellas partes que estarían en contacto directo con el agua utilizada en los ensayos (Figura 16). Posteriormente se procedió al pintado en color azul oscuro de dicha estructura metálica del ICF como puede apreciarse en la Figura 16.

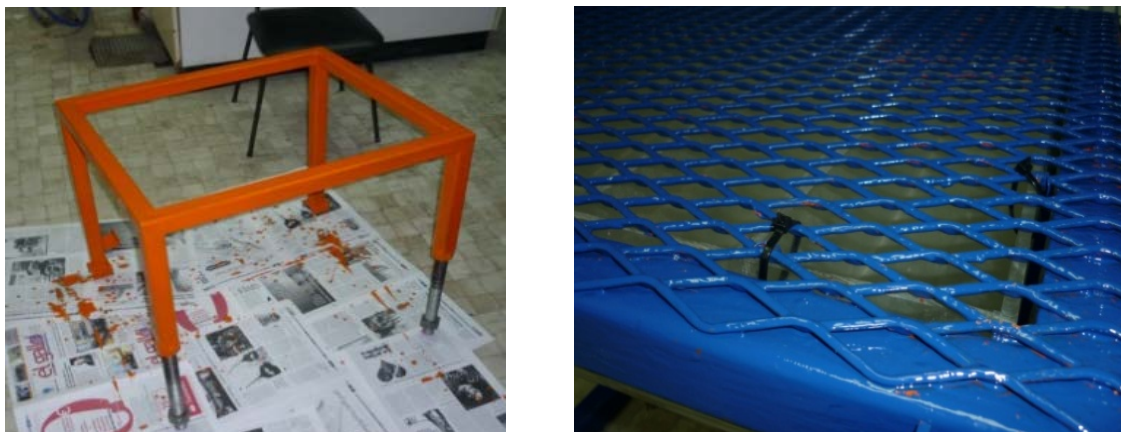


Figura 16. Tratamiento antioxidante de la estructura metálica del ICF y posterior pintado de la misma.

- **Fase 2.** Disposición del recipiente plástico receptor del agua infiltrada. Se dispone este recipiente que posee 5 divisiones que permiten llevar el agua infiltrada en tramos de 10 cm hacia los recipientes de medida del agua infiltrada mediante tubos plásticos colocados según puede verse en la Figura 17. El recipiente con las 5 divisiones se ata a la estructura metálica del bastidor del ICF mediante bridas de plástico, sellando los huecos perimetrales que quedan entre el recipiente y la propia estructura metálica del ICF mediante cinta americana, evitando pérdidas de agua durante los ensayos (Figura 17).



Figura 17. Recipiente receptor atado al bastidor metálico del ICF mediante bridas de plástico (izquierda) y disposición de la cinta americana a modo de sellado perimetral (derecha).

Fases del ensayo:

- **Fase 1.** Disposición del marco de madera en el interior de la cual irá situada la probeta de pavimento permeable a ensayar. Se dispone el marco de madera y sobre él la estructura de metacrilato perimetral, tal y como puede verse en la Figura 18, permitiendo recoger aquellas gotas de agua que reboten en la superficie permeable. El marco de madera cuenta con una rejilla de acero en su parte frontal, fija mediante bridas de plástico (Figura 18).



Figura 18. Marco de madera en el que irán dispuestas las probetas de pavimento permeable a ensayar.

- **Fase 2.** Colocación de la tubería perforada que simulará la escorrentía superficial en los ensayos. Se practican dos agujeros en los extremos de la parte superior del metacrilato perimetral al marco de madera descrito en la Figura 18 con el objetivo de fijar la tubería perforada a dicha estructura de metacrilato mediante bridas de plástico (Figura 19).



Figura 19. Perforación practicada en la estructura de metacrilato perimetral al marco de madera (izquierda) y posterior fijación del tubo perforado mediante bridas de plástico (derecha).



- **Fase 3.** Disposición de la probeta de pavimento permeable. Cada probeta de pavimento permeable se dispone en la estructura del ICF repitiendo los mismos pasos para la capa de geotextil y base, comunes, y cuidando la colocación de la superficie dependiendo del tipo y material de la misma. Esta fase se detalla para cada tipo de pavimento en el siguiente apartado.
- **Fase 4.** Colocación del soporte metálico superior y del simulador de lluvia directa. Las hileras de goteros que simularán la lluvia directa sobre la superficie permeable se fijan a la estructura del soporte metálico superior mediante bridas de plástico. Una vez fijadas se colocan sobre el bastidor regulable con el marco de madera y la probeta de pavimento permeable según Figura 20.

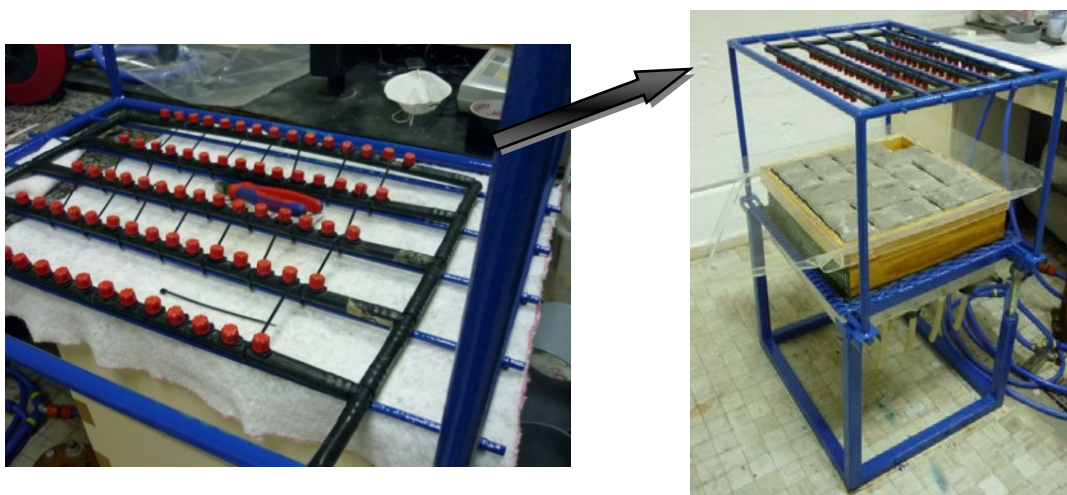


Figura 20. Colocación de la hilera de goteros para simular la lluvia directa sobre la superficie permeable (izquierda) y vista general de la apariencia del ICF en este punto del proceso de montaje (derecha).

- **Fase 5.** Disposición de los caudalímetros de control de los caudales de la escorrentía superficial y del agua de lluvia directa. Los caudalímetros se colocan amarrados a la estructura del soporte metálico del simulador de lluvia directa como se puede ver en la Figura 21.



Figura 21. Disposición de los caudalímetros de control de los caudales de la escorrentía superficial y del agua de lluvia directa.

### 3.2.2 CONSTRUCCIÓN DE LOS PAVIMENTOS PERMEABLES A ANALIZAR

La construcción de los pavimentos permeables en el ICF (fase 3 del ensayo) puede dividirse en los siguientes pasos.

**Paso 1.** En todos los casos se comienza disponiendo el geotextil de separación y filtro sobre el bastidor metálico con inclinación regulable y dentro del marco de madera. Se corta un paño de geotextil de medidas 61 cm x 61 cm de forma que quede un pequeño doblez de unos 5 cm por cada lado para recoger en su interior la capa base de árido calizo y evitar que éste se desparrame sobre el recipiente receptor del agua infiltrada fijado bajo el bastidor metálico (Figura 22).

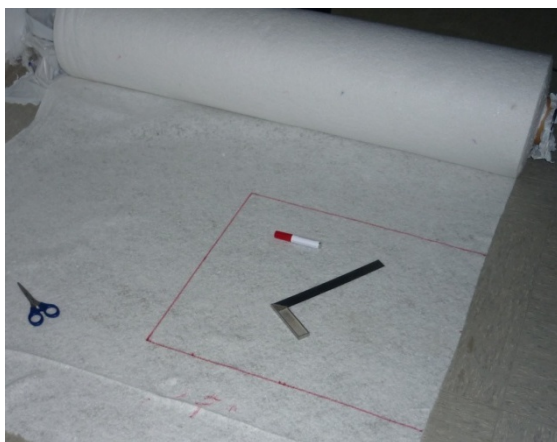


Figura 22. Disposición del geotextil en la probeta de pavimento permeable del ICF.

**Paso 2.** Una vez dispuesto el geotextil se deposita el árido calizo de tamaño 4-6,3 mm previamente lavado, secado y tamizado (Figura 23). Una vez colocada y nivelada correctamente esta capa base de 5 cm de espesor, se le aplican varios golpes de maza de goma sobre una tabla de madera, produciendo la nivelación de la capa y una pequeña compactación (Figura 24).



Figura 23. Disposición de la capa de árido calizo y nivelación de la misma.

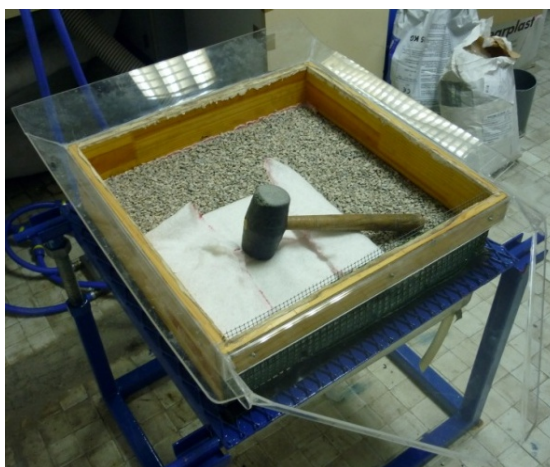


Figura 24. Uso de la maza sobre una tabla para pequeña compactación y nivelación de la capa granular de base.

**Paso 3.** Para finalizar se fabricaron las superficies permeables y se dispusieron sobre las dos capas anteriores siguiendo los pasos que se detallan a continuación en función de cada una de las superficies permeables analizadas.

Los adoquines con ranuras, proporcionados por la empresa Bloques Monserrat, se disponen de forma que se garantizase la permeabilidad de la superficie. Primero se colocaron los adoquines según el esquema que puede verse en la Figura 25, seguidamente se compactaron ligeramente mediante suaves golpes con la maza de goma



utilizando una tabla de madera para repartir el impacto como ya se hizo en la base (Figura 24). Para finalizar se niveló la superficie, dejándola preparada para el sellado final del hueco que quedaba entre ella y el marco de madera del ICF.



Figura 25. Colocación de la superficie permeable y ligera compactación (izquierda), y nivelación (derecha).

En el caso de las otras dos secciones a ensayar, se necesitó fabricar varias probetas de las superficies permeables con las medidas adecuadas para poder disponerlas en su configuración final dentro de la sección de pavimento permeable a ensayar en el ICF.

La superficie permeable de hormigón poroso se obtuvo mediante el vertido desde el camión hormigonera sobre tres moldes metálicos de 50 cm x 50 cm x 10 cm, durante la construcción del aparcamiento experimental de las Llamas (Gómez-Ullate, 2011), con lo que el material utilizado en los ensayos de laboratorio y de campo fue exactamente el mismo. Las masas de cada una de las probetas fabricadas fueron los siguientes (Tabla 9):

Tabla 9. Masas de las distintas probetas de hormigón poroso reforzado con polímeros fabricadas para el ICF.

Probeta de hormigón poroso	Masa (kg)	Densidades aparentes (Kg/m <sup>3</sup> )	Porcentaje de huecos (%)
1	44,950	1798	28,91
2	44,400	1776	29,68
3	44,000	1760	30,20

La mezcla de asfalto poroso fue suministrada por la empresa SENOR, siendo recalentada para darle su forma final en el Laboratorio de Caminos y Aeropuertos de la Universidad de Cantabria. Para la fabricación de la probeta se emplearon los mismos

moldes metálicos de 50 cm x 50 cm de superficie y 10 cm de espesor, siendo necesario calentar la mezcla dispuesta en cazuelas en estufa a 140°C durante cuatro horas y media para poder manejarla y compactarla adecuadamente en los moldes. Para ello fue necesario calentar los moldes previamente durante 30 minutos en la estufa a la misma temperatura de la mezcla. Una vez precalentado, se aplicaba al molde una capa de aceite en las partes que estarían en contacto con la mezcla para de esta manera poder desmoldar la probeta con facilidad una vez que ésta se hubiese enfriado. La mezcla se repartía en el interior del molde mediante el uso de una espátula hasta superar levemente el espesor de 10 cm del molde como puede verse en la Figura 26.



Figura 26. Uso de la espátula para esparcir la mezcla de forma homogénea en el interior del molde.

Finalmente se colocaba un geotextil sobre la mezcla dispuesta ya en el interior del molde metálico para que la placa de compactación no entrase en contacto directo con la superficie permeable y evitar posibles efectos adversos. Sobre este geotextil se dispuso de una chapa metálica sobre la que se colocaba el compactador, tal y como aparece reflejado en la Figura 27.



Figura 27. Detalle de la colocación del geotextil y la chapa metálica sobre la probeta de asfalto poroso.

Se aplicó una compactación (Figura 28) en tandas de un minuto aproximadamente mediante movimientos perimetrales y en diagonal del compactador vibratorio sobre el molde que contenía la mezcla, asegurando así la compactación uniforme de toda la superficie, quedando esta perfectamente enrasada con la parte superior del molde (10 cm de espesor).



Figura 28. Compactado de la probeta de asfalto poroso.

Se utilizó para la fabricación de cada probeta una cantidad media aproximada de 54 kg (Tabla 10).

Tabla 10. Masa, densidad aparente y porcentaje de huecos de las distintas probetas de asfalto poroso.

Probeta de asfalto poroso	Masa (kg)	Densidad aparente (Kg/m <sup>3</sup> )	Porcentaje de huecos geométricos (%)
1	54,200	2168	18,89
2	56,000	2240	16,20
3	51,300	2052	23,23

Los valores de los porcentajes de huecos geométricos obtenidos en la tabla anterior se aproximan a los obtenidos mediante la aplicación del perméametro LCS y de la norma NLT-327/00 (2000), que fueron de una media de 23,19%.

**Paso 4.** Un elemento que fue común a todas las superficies permeables fue el del sellado perimetral de las probetas para evitar infiltraciones de agua perimetrales que distorsionasen el ensayo con el ICF. El sellado se realizó mediante el uso de silicona blanca, dispensado con una pistola sobre el perímetro de la probeta y extendido con los dedos de las manos de forma más precisa, estando éstos protegidos mediante el uso de guantes de látex. Además, se embadurnaron con agua y jabón los guantes de látex para mejorar el deslizamiento de los dedos sobre la silicona (Figura 29).



Figura 29. (A) Apariencia final de la probeta de adoquines con ranuras, (B) hormigón poroso reforzado con polímeros y (C) la probeta de asfalto poroso, dispuestas en el ICF y preparadas para ser ensayadas.

### 3.2.3 DESCRIPCIÓN DEL ENSAYO

#### 3.2.3.1 Condicionantes y etapas del ensayo

Los ensayos para la medida de las tasas de infiltración y de la escorrentía de pavimentos permeables en laboratorio fueron llevados a cabo en el Laboratorio de Caminos y Aeropuertos de la Universidad de Cantabria con los materiales, aparatos y métodos descritos anteriormente. El objetivo de estos ensayos fue estudiar las tasas de infiltración y la escorrentía residual de un pavimento permeable en un contexto determinado por las condiciones de colmatación a las que un pavimento permeable puede estar expuesto durante su vida útil.

Se tomó como base la investigación de Rodríguez Hernández (2008) para realizar una comparativa entre el comportamiento de diferentes pavimentos permeables bajo la misma intensidad de lluvia extrema, analizando las modificaciones que se producirían en dicho comportamiento hidráulico (tasas de infiltración y escorrentía superficial) bajo las siguientes condiciones o escenarios de colmatación de la superficie permeable, con el objetivo de cuantificar el grado de eficacia del control en origen de inundaciones en cada caso (Figura 30):

- **Superficie permeable recién construida.** Este nivel de colmatación representa el comportamiento en infiltración de una superficie permeable recién construida en condiciones ideales de servicio sin ningún tipo de sedimentos que la pudiesen colmatar.
- **Superficie colmatada.** En este escenario se representa las condiciones de un aporte masivo de sedimentos en superficie y las consecuencias instantáneas que éste tendría sobre el comportamiento en infiltración de la superficie permeable.
- **Superficie colmatada con mantenimiento.** Por último, se añade un tercer escenario en el que trata de analizarse la influencia que el mantenimiento habitual realizado en España mediante máquinas barredoras puede tener en la posible recuperación de la capacidad de infiltración de la superficie permeable y en la modificación de sus tasas de infiltración.



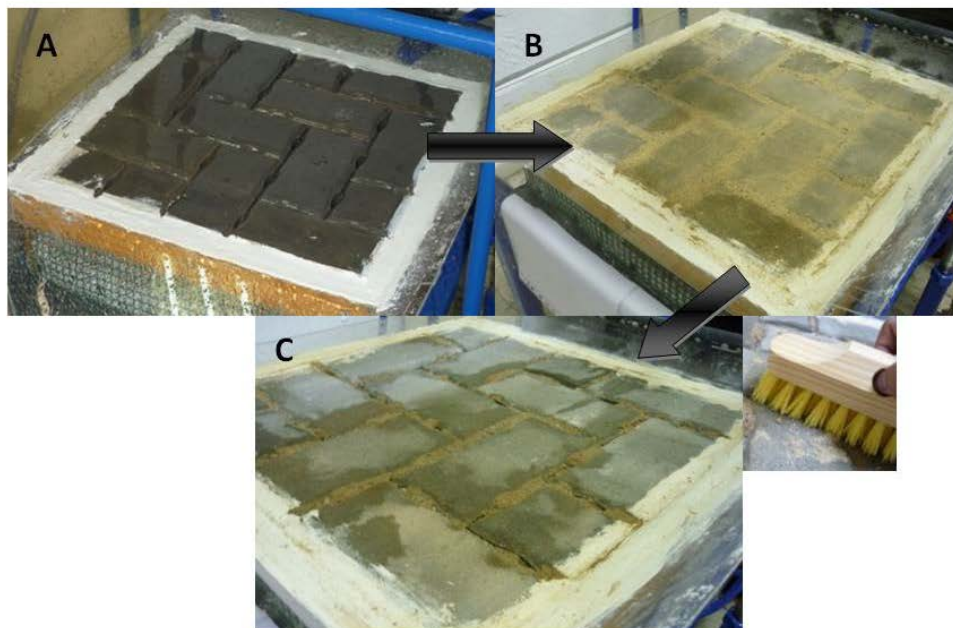


Figura 30. Escenarios de colmatación. (A) Superficie permeable recién construida, (B) superficie permeable colmatada, y (C) superficie permeable colmatada con mantenimiento (abajo).

Todos los ensayos fueron realizados bajo las mismas condiciones de intensidad de lluvia, y sobre un rango estable de temperatura y humedad en laboratorio, tratando de simular las condiciones reales de la ciudad de Santander (Cantabria), España (Sañudo-Fontaneda et al. 2013):

- Intensidad de lluvia. 60 mm/h, correspondiente a un periodo de retorno de 50 años para una duración del evento de lluvia de 30 minutos en la ciudad de Santander, España (Cué Pérez et al., 2006).
- Rango de temperatura: 16-20°C.
- Humedad: 70-80%.

La intensidad de lluvia que se ensayó sobre las superficies permeables implica que fue necesario simular un caudal de 15 m<sup>3</sup>/h en el simulador de lluvia directa, equivalente a una precipitación de 60 mm/h cayendo sobre la superficie de las probetas de pavimento permeable colocadas en el ICF (0,25 m<sup>2</sup>), controlado a través de su correspondiente caudalímetro. Del mismo modo, también fue necesario simular 15 m<sup>3</sup>/h de caudal en el tubo perforado que actúa como simulador de la escorrentía superficial procedente de las zonas impermeables adyacentes a la superficie permeable. Esto equivale a aceptar la hipótesis de que los 60 mm/h de lluvia cayendo sobre una superficie impermeable, de área igual a la superficie permeable sobre la que vierte, se transforman en escorrentía superficial (coeficiente de escorrentía de 1), y por lo tanto, en un caudal de 15 m<sup>3</sup>/h.

La duración de todos los ensayos fue de 30 minutos, correspondientes a la duración del evento de lluvia seleccionado. No obstante, el ensayo quedó dividido en dos etapas a saber:

- Etapla previa. Se trata del tiempo necesario para que el agua que está infiltrando a través del pavimento permeable alcance un estado estacionario, mojando todas las capas de forma que se evite alterar los resultados de las tasas de infiltración. Esta etapa dura 10 minutos en base a estudios previos realizados por Davies et al. (2002) y Rodriguez-Hernandez et al. (2012). No obstante, se realizaron ensayos previos de calibración, demostrando que para la intensidad de lluvia utilizada en esta investigación, 3 minutos de tiempo podrían bastar para alcanzar el comportamiento estable del agua en cuanto a infiltración, quedando por tanto dentro del rango de seguridad que otorgan los 10 minutos utilizados.
- Etapla de medida. Periodo en el que se miden las tasas de infiltración, una vez alcanzado el estado estacionario. El tiempo de medida es de 20 minutos, siguiendo los estándares marcados por Rodriguez-Hernandez et al. (2012). Esta medida se realiza anotando el peso de cada una de las 5 cámaras de recogida del agua de infiltración situadas debajo de la probeta de pavimento permeable, lo cual permite obtener el volumen del agua de lluvia infiltrada cada 10 cm a lo largo del pavimento permeable, y por tanto su porcentaje con respecto al total del agua ensayada (tiempo de ensayo por caudal de lluvia directa más caudal de escorrentía superficial).

Los objetivos fundamentales de este ensayo quedan divididos en dos grandes bloques. Por un lado está la obtención de unos modelos estadísticos de regresión lineal que permitan el análisis en profundidad del comportamiento en infiltración basado en los resultados de las tasas de infiltración de cada pavimento permeable en los escenarios de colmatación extremos (superficie recién construida y superficie colmatada). El segundo objetivo fue el análisis de la escorrentía residual de un pavimento permeable en los tres escenarios de colmatación analizados en el ensayo. Ambos objetivos tratan de dar respuesta al objetivo particular marcado en esta tesis de desarrollar y validar la metodología de laboratorio para el análisis de la capacidad de infiltración de pavimentos permeables.

### 3.2.3.2 Variables del ensayo

Para lograr el primer objetivo relacionado con la obtención de las tasas de infiltración, fue necesario definir las variables independientes que fueron objeto de este estudio, y las cuales fueron seleccionadas en base a estudios previos llevados a cabo por Davies et al. (2002), Collins et al. (2008b), Lucke and Beecham (2011a) y Rodríguez-Hernandez et al. (2012). Dichas variables independientes son variables asociadas con la topografía del terreno, y variables por tanto que pueden influenciar de manera decisiva sobre el diseño de un pavimento permeable (Figura 31):

- ❖ **Distancia de Infiltración** (Runoff surface length -  $R_{SL}$ ). Esta variable independiente representa la distancia medida en cm recorrida por una gota de agua de la escorrentía superficial, medida desde la parte superior de la probeta de superficie permeable, correspondiente al lado adyacente al tubo perforado que simula la entrada de escorrentía superficial, en dirección perpendicular a este, hasta el recipiente de recogida del agua de infiltración donde termina dicha gota de agua. Los valores entre los que se colocan los recipientes de recogida que toman las medidas de las tasas de infiltración son 10, 20, 30, 40 y 50 cm.
- ❖ **Pendiente de la Superficie** (Surface slope -  $S_s$ ). Esta variable independiente representa la pendiente de la probeta de superficie permeable expresada en porcentaje de altura frente a longitud. Los valores de ensayo fueron 0, 3, 5, 7 y 10%.

Por otro lado, la variable dependiente de este estudio es la **Tasa de Infiltración acumulada** (Cumulative infiltration rate -  $C_{IR}$ ) (Figura 31). Esta variable dependiente representa el porcentaje de agua infiltrada acumulada en cada una de las cámaras de recogida del agua infiltrada respecto al total empleado en el ensayo (Figura 31), comenzando desde la distancia más próxima a la entrada de la escorrentía superficial y midiendo hasta el final cada 10 cm es decir, tasa de infiltración acumulada a los 10 cm, a los 20, 30, 40 y 50 cm respectivamente.

Para la obtención del segundo objetivo relacionado con el análisis de la escorrentía superficial, se recogieron los volúmenes de agua resultantes de cada ensayo en una cámara situada al final de los 50 cm de superficie permeable (Figura 31). Ese valor medido en porcentaje sobre el total de agua utilizada en el ensayo determina un valor de

la capacidad de infiltración total de cada probeta ensayada. Estos ensayos se realizaron con el objetivo de desarrollar un análisis estadístico comparativo que permitiese cuantificar el aumento de la escorrentía superficial residual, o reducción de la capacidad de infiltración, en función del escenario de colmatación y el tipo de superficie permeable. En este caso la variable dependiente es la **Escorrentía superficial residual** (Residual runoff -  $R_R$ ), medida en porcentaje respecto al total de agua utilizada en el ensayo (Figura 31).

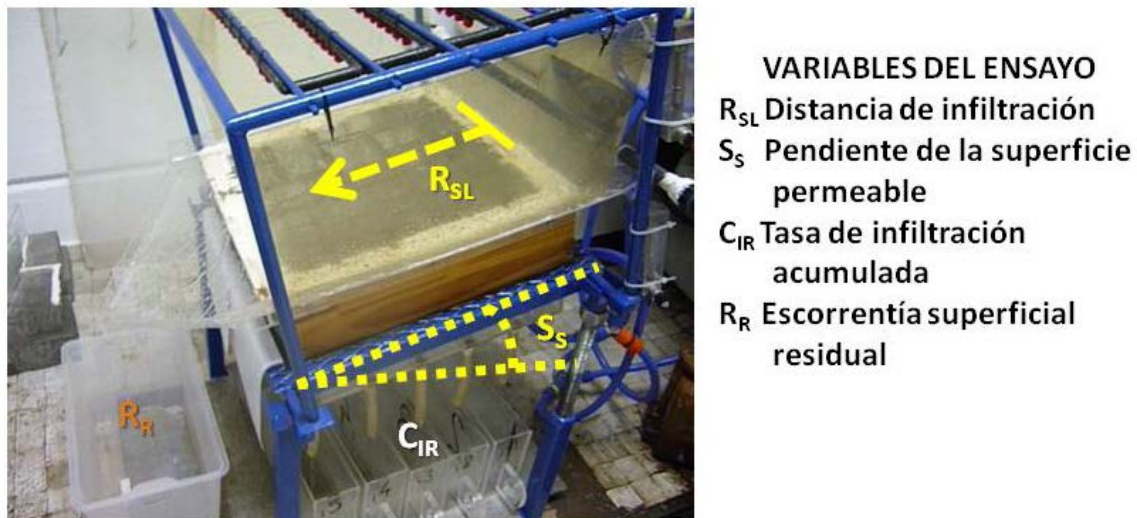


Figura 31. Esquema explicativo de las variables que intervienen en el ensayo.

Aclarar que mediante ensayos previos de calibración, se comprobó que para el geotextil elegido, con la pendiente máxima del 10%, no se producía escorrentía subsuperficial, desestimándose en el resto del estudio esta variable de medida permitida por el nuevo diseño del ICF.

Con el objeto de estudiar estadística y descriptivamente las diferencias existentes entre el comportamiento en infiltración de cada una de las superficies permeables (Figura 32) se realizaron 3 muestras de pavimento permeable (3 probetas por cada superficie permeable de estudio) usando siempre el mismo material de base y el mismo geotextil.



Figura 32. Detalle de las superficies permeables ensayadas en el ICF. Adoquines impermeables en disposición permeable (izquierda), hormigón poroso reforzado con polímeros (centro) y asfalto poroso (derecha).

Por tanto, teniendo en cuenta que se quieren estudiar 3 tipos distintos de pavimentos permeables, definidos por sus superficies (adoquines con ranuras, asfalto poroso y hormigón poroso) bajo 3 escenarios de colmatación, con 5 pendientes distintas, el número de ensayos resultante por superficie permeable es de 45. El total de ensayos con el ICF será entonces de 135, obteniéndose un total de 675 datos de tasas de infiltración (5 por ensayo) y 135 datos de escorrentía residual (1 por ensayo).

Los resultados que se obtengan de los ensayos serán analizados descriptivamente. Además, se llevarán a cabo análisis estadísticos específicos mediante el software IBM SPSS Statistics 22. Dichos análisis estadísticos tendrán como finalidad la discusión de los resultados y la obtención de modelos de regresión lineal para cada superficie.

### 3.2.3.3 Fundamentos teóricos del ensayo

A continuación se define el proceso hidrológico que tiene lugar en la sección de los pavimentos permeables ensayados en el ICF. La alta permeabilidad de la capa de superficie permeable y de la capa de base de árido calizo ensayadas en el ICF permite definir a ambas capas como medios no saturados, donde la Ley de Darcy puede ser aplicada bajo la asunción de que el flujo estacionario que pasa a través de ellas está gobernado por las ecuaciones de Navier-Stokes (Rodriguez-Hernandez et al. 2012; Charbeneau et al. 2010; Sansalone et al. 2008).

Si bien cabe hacer una excepción en el caso de los adoquines impermeables (Sansalone et al. 2008). En ellos, la infiltración se produce a través de sus ranuras elípticas y no a través de un medio poroso caracterizado por sus huecos interconectados. No obstante, este hecho no es óbice para validar dicha hipótesis matemático-hidráulica en el caso de los adoquines impermeables con ranuras, dado que el resultado de infiltración a

través de dicha capa puede ser equivalente (Charbeneau et al. 2010). Si se tiene en cuenta que el volumen de las ranuras en cada adoquín es de  $60 \text{ cm}^3$  en un escenario sin sedimentos que colmaten parcial o totalmente la superficie de estudio, sería necesario un volumen de agua de idéntica magnitud al menos ( $60 \text{ cm}^3$ ) para comenzar a generar escorrentía superficial, y por tanto, producir una variación en el fenómeno físico que se produce en el ensayo. Este hecho conduce hacia una intensidad de lluvia simulada necesaria para propiciar dicha escorrentía superficial de  $432 \text{ mm/h}$ . Es necesario recordar que el ICF es capaz de simular lluvia entre  $10$  y  $150 \text{ mm/h}$ , por lo que en ningún caso y bajo las condiciones de ensayo particulares de esta investigación, se alcanzarían las condiciones necesarias para invalidar las hipótesis matemático-hidráulicas que definen este estudio.

La conductividad hidráulica de las superficies permeables recién colocadas siempre alcanza el valor de la intensidad de lluvia simulada en el ICF, dado que el límite superior de simulación de aporte de agua está por debajo del límite de infiltración de las superficies sin colmatar. Por tanto, las variables que tendrán una mayor importancia en este contexto y bajo estas condiciones de ensayo serán las variables de tipo topográfico descritas anteriormente (distancia de infiltración  $R_{SL}$  y pendiente  $S_S$ ) en el caso de la determinación de las tasas de infiltración de una superficie permeable recién colocada. Durante el proceso de colmatación, otros factores como la cantidad de sedimentos influirán en la reducción de la capacidad de infiltración. No obstante, el proceso seguirá estando gobernado por los mismos fenómenos físicos.

#### **3.2.3.4 Análisis de la capacidad de infiltración del geotextil en las secciones de pavimentos permeables con superficies de aglomerado poroso**

Como complemento a los ensayos con el ICF, se efectuó un análisis general sobre el geotextil DANOFEEL PY 150 utilizado en las secciones de pavimento permeable con superficies de aglomerado poroso ensayadas en el ICF para determinar las diferencias existentes entre su estado inicial antes de ser ensayado y su estado final, después de haberse ensayado en los tres estados de colmatación. Los ensayos que se le practicaron a los geotextiles fueron realizados en el Laboratorio de Geosintéticos de la Universidad de Cantabria (LAGUC) y fueron los siguientes (Figura 33):

- Permeabilidad perpendicular al plano según UNE-EN ISO 11058 (2010).
- Masa por unidad de superficie según UNE-EN ISO 9864 (2005).





Figura 33. Ensayo de permeabilidad al agua perpendicularmente al plano sin carga según UNE-EN ISO 11058:2010 (izquierda) y ensayo de la masa por unidad de superficie según UNE-EN ISO 9864 (2005) (derecha).

### 3.2.4 SEDIMENTOS UTILIZADOS EN LA COLMATACIÓN DE LAS SUPERFICIES PERMEABLES

#### 3.2.4.1 Selección de los sedimentos

Los sedimentos utilizados para alcanzar el estado de superficie colmatada en todas las superficies permeables analizadas en el ICF fueron de naturaleza caliza por tratarse del sedimento más común que se acumula en las carreteras de Cantabria (Zafra Mejía et al. 2011). Además, un 14% del peso total del árido utilizado como sedimento tenía naturaleza orgánica, habiéndose obtenido mediante el uso de serrín. Estudios realizados por Pratt et al. (1990) y Davies et al. (2002) pusieron de manifiesto la importancia de un alto porcentaje de materia orgánica en los sedimentos como factor potenciador de la colmatación de una superficie permeable. Los valores más altos utilizados en dichas investigaciones fueron de un 11%. Basándose en estos estudios se decide subir hasta un 14% para comprobar dicha influencia.

Una vez seleccionado el tipo de material a utilizar y el porcentaje de materia orgánica a incluir en los sedimentos, se determinó la granulometría que debieran de tener los sedimentos para provocar un daño mayor a cada superficie permeable. Basándose en estudios previos llevados a cabo por Davies et al. (2002) y Gonzalez-Angullo (2008) en adoquines, y Tan et al. (2000) en superficies de aglomerado poroso se optó por usar las siguientes granulometrías mostradas en la Figura 34 en función de la superficie permeable:

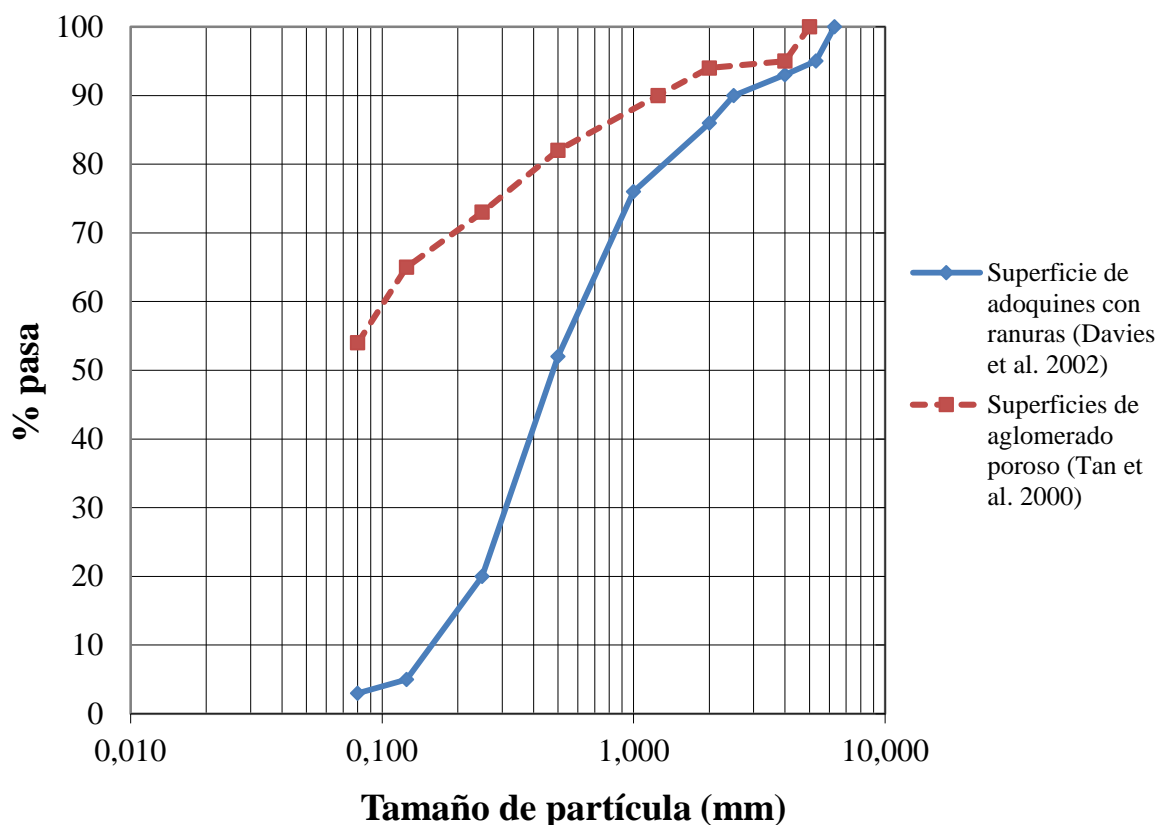


Figura 34. Granulometría de los sedimentos utilizados para colmatar la superficie de adoquines y las superficies de aglomerado poroso (hormigón y asfalto poroso).

Las distintas granulometrías estudiadas fueron elegidas en base al tamaño de los sedimentos colmatantes, que en el caso de las superficies porosas debe ser más pequeño para causar un mayor daño puesto que los huecos del mismo son menores obviamente que las ranuras que hay entre los adoquines impermeables. Por ello y para facilitar la penetración de los sedimentos, la granulometría de los mismos debe ser diferente en ese sentido. El proceso de colmatación vendría influido igualmente por este hecho.

La materia orgánica en forma de serrín fue añadida en el rango de los siguientes husos granulométricos: 0,250-0,500 mm y < 0,080 mm (tamaño de finos) en el caso de los adoquines con ranuras. Mientras que en el caso de las superficies de aglomerado poroso, el serrín se añadió en el rango desde tamaño de finos a 0,500 mm. Se optó por dichos husos en ambos casos por ser los más pequeños dentro de cada granulometría de los sedimentos, con el objetivo de causar el mayor daño posible a la capacidad de infiltración de los pavimentos permeables estudiados.



### 3.2.4.2 Preparación de los sedimentos

La metodología de preparación y aporte de los sedimentos para colmatar las superficies permeables siguió las fases que se muestran a continuación:

- **Fase 1: Preparación del sedimento.** Selección de árido calizo dentro de un rango de tamaños que va desde los finos ( $< 0,080$  mm) hasta  $6,300$  mm en el caso del sedimento utilizado para colmatar la superficie de adoquines impermeables en disposición permeable, y hasta  $5,000$  mm para el caso de las superficies de aglomerado poroso. Posteriormente se procede al lavado del sedimento y a su secado utilizando para ello una estufa a  $110^{\circ}\text{C}$  durante unas cuatro horas aproximadamente. El siguiente paso dentro de esta fase fue el de tamizar los sedimentos en base a las granulometrías expuestas en la Figura 34, usando tamices UNE como puede verse en la Figura 35. Seguidamente se dividió cada tamaño de sedimento en distintas bandejas (Figura 35) para poder ir añadiendo después el porcentaje exacto de cada tamaño para obtener la granulometría final. De igual manera se tamizó y se dividió el serrín que fue utilizado a modo de materia orgánica. Una vez obtenida la granulometría final, se procedió a mezclar los sedimentos utilizando una espátula, preparando bandejas con  $500$  g cada una de sedimentos ya mezclados. En el caso de los adoquines se utilizaron dos bandejas con un total de  $1000$  g, mientras que en el caso de las superficies de aglomerado poroso se utilizó una única bandeja con  $500$  g para cada simulación de colmatación.



Figura 35. (A) Preparación de los sedimentos con los tamices UNE y (B) las bandejas para dividir los distintos tamaños de sedimento, y (C) pesado de bandeja con la mezcla final de sedimento.

- Fase 2. Extendido y compactación de los sedimentos.** Se empleó una cuchara para el vertido de los sedimentos ya mezclados de la fase anterior sobre la superficie permeable. Después, con la ayuda de un pincel (Figura 36), se fueron extendiendo los sedimentos por toda la superficie permeable colmatando las ranuras en el caso de los adoquines y los huecos en el caso de las superficies de aglomerado poroso. Como último paso de esta fase se compactaron los sedimentos al máximo dentro de las ranuras y los huecos utilizando los dedos de la mano. Solo hubo una única etapa de extendido y compactación, siguiendo las experiencias previas de Davies et al. (2002) en el caso de adoquines con ranuras y Rodríguez Hernández (2008) en el caso de las superficies de aglomerado poroso.



Figura 36. Extendido del sedimento sobre la superficie permeable. En el caso de esta figura la superficie permeable fue la de adoquines impermeables con ranuras.

Una vez terminado todo este proceso de preparación y extendido de los sedimentos se procedió a pesar el sedimento sobrante para ver la cantidad exacta de sedimento utilizado para la colmatación de cada probeta de superficie permeable. La cantidad media de sedimento utilizada para colmatar la superficie de adoquines con ranuras, siguiendo la metodología de adición anteriormente expuesta, fue de  $3900 \text{ g/m}^2$ , siendo muy cercana a la cantidad de  $4000 \text{ g/m}^2$  empleada en anteriores investigaciones por Castro et al. (2007). Esta ligera diferencia puede explicarse por el mayor uso de materia orgánica en el caso de los ensayos llevados a cabo en esta tesis doctoral, siendo la densidad del serrín utilizado a modo de materia orgánica menor que la densidad del árido calizo usado en el sedimento. Para el caso de las dos superficies de aglomerado poroso (hormigón poroso y asfalto poroso) la cantidad de sedimento utilizada con la granulometría empleada en la Figura 34 fue de  $2000 \text{ g/m}^2$ , contrastándose de esta manera anteriores estudios llevados a cabo por Rodríguez-Hernandez et al. (2012) sobre superficies de asfalto poroso, los cuales alcanzaron estas mismas cantidades de sedimentos.

Respecto a la simulación del mantenimiento realizado sobre una superficie permeable, se utilizó un cepillo de cerdas duras como el que se muestra en la Figura 37. El cepillado de las superficies colmatadas se realizó con movimientos circulares, apretando con fuerza para poder retirar parte del sedimento introducido en las ranuras y en los huecos de las superficies permeables. Cabe destacar que tanto la labor de aporte de sedimentos como la simulación del mantenimiento fueron realizadas siempre por la misma persona, utilizando la misma energía para la compactación de los sedimentos y para su posterior barrido.



Figura 37. Cepillo de cerdas duras para la simulación de las labores de mantenimiento sobre una superficie permeable.

### 3.3 ENSAYO DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO DE UN FIRME PERMEABLE EN LABORATORIO

Este ensayo fue realizado en la Universidad de Coventry en el Reino Unido como parte de los trabajos llevados a cabo por el autor de esta tesis durante su estancia pre-doctoral, necesaria para optar a la mención de doctor internacional.

#### 3.3.1 SIMULADOR DE LLUVIA

Se diseñó un simulador de lluvia para la realización de estos ensayos, al cual se denominó Portable Laboratory Rainmaker (PLR) o Simulador de Lluvia Portátil. Originalmente se diseñó con una gran sencillez para tratar de simular intensidades de lluvia muy variables, siguiendo el estudio de diferentes curvas Intensidad-Duración-Frecuencia en distintos lugares del mundo recogido en el estudio del estado del arte de esta tesis.

El PLR está dividido en dos partes: la cámara de lluvia y la placa perforada inferior, tal y como puede apreciarse en la Figura 38.

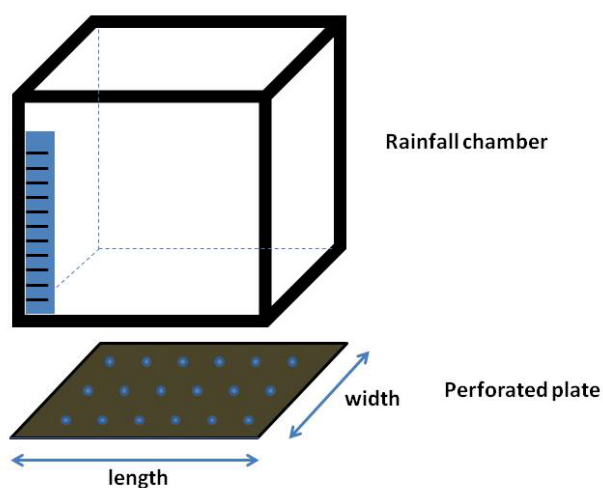


Figura 38. Partes del simulador de lluvia PLR.

La cámara de lluvia incluye una regla que permite medir en todo momento la altura de agua existente. Esta cámara cuenta con dos aberturas, situadas en su parte superior y en su parte inferior, de modo que el agua era introducida a la cámara mediante vertido por su parte superior, y la parte inferior recibía un sellado perimetral para

añadirle el segundo elemento fundamental del PLR. Este elemento es la placa perforada, la cual cuenta con 4 hileras de 4 agujeros cada una, en los que están colocados los goteros por los que pasa el agua contenida en la cámara de lluvia. Los goteros se colocaron en cada agujero sellando las juntas con silicona. Por último se realizó una impermeabilización perimetral de la unión de los dos elementos fundamentales mediante cinta americana, para evitar posibles pérdidas de agua en los ensayos.

Durante la calibración de este simulador de lluvia se probaron diferentes tipos de goteros, buscando una simulación lo más constante posible de la intensidad de lluvia pretendida. Inicialmente se usaron hilos de sedal de pesca situados en las aberturas de la placa perforada. Los problemas que aparecieron hacían imposible obtener una calibración estable, en ocasiones debida a la obturación total del agujero perforado y en otras por el excesivo caudal de agua que dejaba pasar a su través el agujero perforado. Ante esta falta de uniformidad se optó por utilizar el siguiente tipo de goteros de caudal fijo (Figura 39).

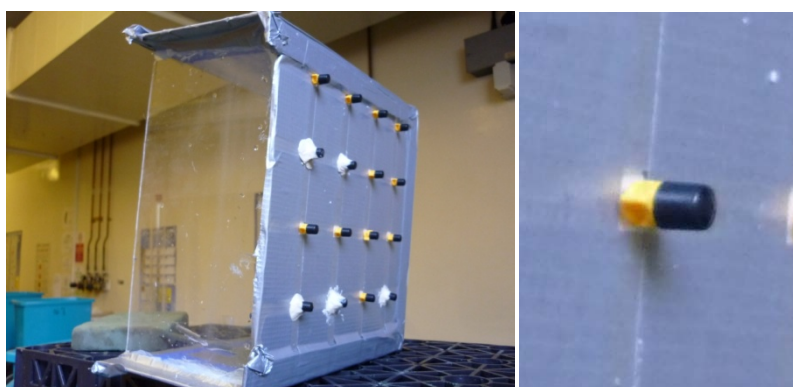


Figura 39. Gotero no ajustable utilizado inicialmente en el simulador de lluvia PLR.

Dicho gotero no funcionó como era de esperar y pronto aparecieron problemas de obturación en su interior, tal y como puede apreciarse en la Figura 40.



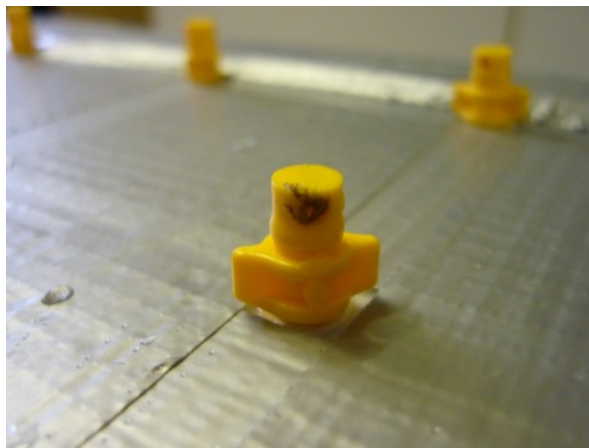


Figura 40. Problemas de obturación detectados en los goteros no ajustables.

Finalmente se optó por un tipo de goteros ajustables del tipo a los utilizados en el simulador de lluvia del ICF. Dichos goteros tienen las siguientes características:

- Diámetro de gota: 3,5 mm.
- Rango del caudal ajustable: 0-40 l/h.

Una vez colocados estos goteros, la configuración final del PLR fue la mostrada en la Figura 41.



Figura 41. Configuración final del simulador de lluvia PLR con los goteros ajustables.

La calibración del PLR consistió en el llenado de la cámara de lluvia y la medida de la intensidad asociada a cada altura de agua medida en cm. Así, durante su funcionamiento, manteniendo cada altura con un aporte continuo de agua, era posible simular una intensidad de lluvia determinada. Para medir la cantidad de agua que salía por los goteros del PLR se utilizó una probeta como puede verse en la Figura 42.



Figura 42. Probeta (izquierda) para la medida del volumen de agua simulado mediante el PLR (derecha).

Los resultados de las calibraciones iniciales dieron como resultado un rango de funcionamiento de entre 50 y 450 mm/h. El resultado de las calibraciones realizadas para el simulador PLR se muestra a continuación en la Figura 43.

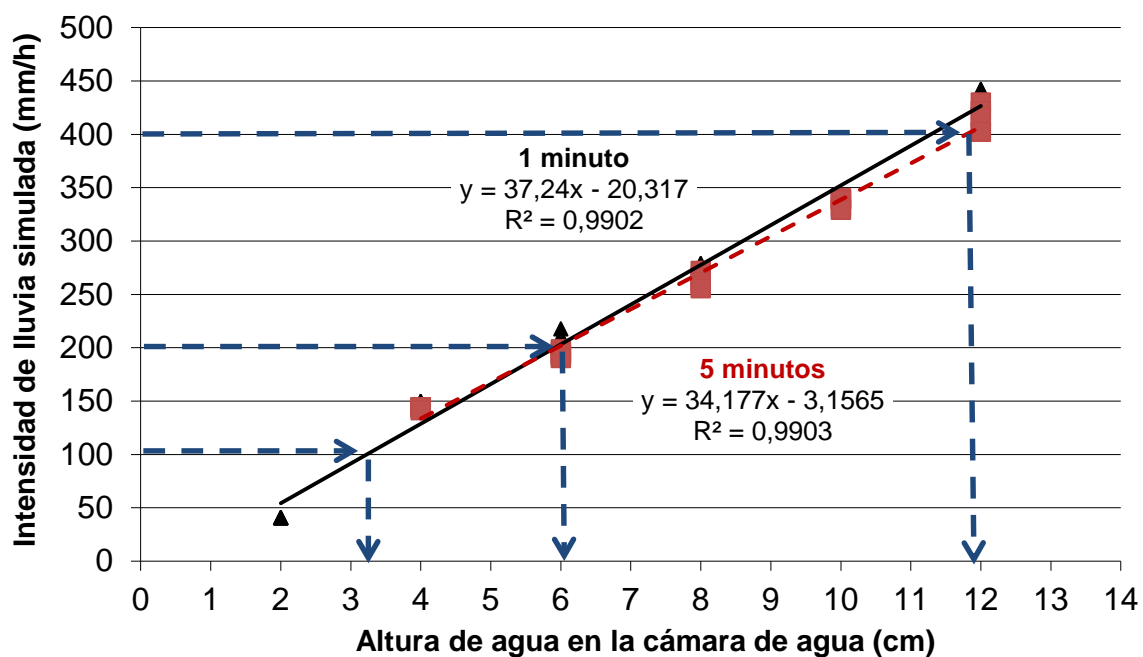


Figura 43. Calibraciones realizadas sobre el simulador PLR para eventos de lluvia de duración 1 y 5 minutos, respectivamente.

Se observó durante las calibraciones que el funcionamiento de este simulador de



lluvia presentaba algún defecto en cuanto a su precisión (pérdidas de intensidad en la simulación de lluvia de hasta un 20%) para simular intensidades de lluvia con un tiempo de duración superior a los 15 minutos, lo que afectaba a los ensayos realizados sobre las secciones de OASIS®. Este hecho propició la decisión de sustituir el simulador por otra metodología de adición de cantidades determinadas de agua por cada minuto mediante un recipiente calibrado. De esta manera se añadió manualmente la cantidad de agua por minuto equivalente a la que tendría que ser simulada por el PLR. Bajo esta metodología se realizaron todos los ensayos y se consiguió la repetitividad suficiente para poder comparar los resultados obtenidos, quedando como punto pendiente para futuras líneas de investigación el diseño de un simulador de lluvia más preciso.

### 3.3.2 CONSTRUCCIÓN DE LAS SECCIONES DE FIRMES PERMEABLES A ANALIZAR

Las secciones de firme diseñadas en la Universidad de Coventry durante la estancia pre-doctoral del autor de esta tesis fueron las siguientes mostradas en la Tabla 11, todas ellas basadas en los estudios previos llevados a cabo por Nnadi et al. (2009) en dicha universidad y basadas en algunas de las secciones de firmes permeables más utilizadas por algunas de las empresas más importantes de paisajismo en el Reino Unido.

Tabla 11. Secciones utilizadas en la investigación.

Nombre de la sección	Capas	Material	Profundidad (cm)
<b>CONTROL</b>	Superficie permeable	Adoquines impermeables	10
	Base	Árido calizo 4-6,3 mm	5
	Separación y filtración	No	—
	Sub-base	Árido calizo 20-40 mm	35
<b>OASIS 1.3</b>	Superficie permeable	Adoquines impermeables	10
	Base	Árido calizo 4-6,3 mm	5
	Separación y filtración	OASIS®	1,3
	Sub-base	Árido calizo 20-40 mm	35
<b>OASIS 2.0</b>	Superficie permeable	Adoquines impermeables	10
	Base	Árido calizo 4-6,3 mm	5
	Separación y filtración	OASIS®	2
	Sub-base	Árido calizo 20-40 mm	35

Por lo tanto, tres tipos de secciones de firmes permeables fueron analizadas mediante el uso del simulador PLR, sustituyendo en dos de ellas la capa de geotextil por un material innovador en la construcción de firmes permeables denominado OASIS®. Todo ello con el objetivo de analizar la influencia en el comportamiento en infiltración de este producto innovador sobre el global de la sección de un firme permeable.

Se utilizaron contenedores como el de la Figura 44 para albergar las secciones de firme permeable. Un total de 9 contenedores fueron utilizados, 3 por cada tipo de sección de firme permeable. A cada contenedor se le practicó un agujero en su parte inferior, disponiendo un trozo de tubería de plástico para poder evacuar el agua que había atravesado todas las capas del firme permeable (Figura 44).



Figura 44. Contenedor utilizado para albergar la sección del firme permeable con un tubo de plástico dispuesto en la parte inferior del mismo y esquema de los 9 contenedores utilizados en los ensayos.

En cuanto a la colocación del material en los contenedores, primero se dispuso la capa de sub-base de árido calizo de 35 cm (Figura 45) con tamaño de árido de entre 10 y 63 mm tal y como se especificó en la metodología.



Figura 45. Árido de sub-base colocado en el interior del contenedor.

Posteriormente se dispuso la capa de separación y filtro ejecutada con el nuevo producto denominado OASIS® (Figura 46). El área ocupada por esta capa de separación y filtro se obtuvo en base a las siguientes operaciones matemáticas:

$$A = [0,20 \times 0,080] \times 3 + [0,20 \times 0,035] \times 2 \approx 0,060m^2$$

$$\text{Profundidad} = 0,013 \text{ y } 0,020 \text{ m}$$

$$V = 0,06 \times 0,013 \approx 0,00078m^3 = 0,78dm^3$$

$$V = 0,06 \times 0,020 \approx 0,00120m^3 = 1,20dm^3$$



Figura 46. Detalle de la sección transversal de la capa de separación y filtración conformada por el OASIS®.

Una vez dispuesta la capa de OASIS® sobre la capa de sub-base de material granular, se dispuso la capa de base de 5 cm de árido calizo de granulometría entre 4 y 10 mm (Figura 47).



Figura 47. Capa de árido de base de tamaño 4 - 6,3 mm.

Por último se dispuso la capa de superficie permeable, que fue en todos los casos de adoquines con ranuras de la marca AQUAFLOW block® en color natural de la empresa FORMPAVE, como puede verse en la Figura 48.



Figura 48. Adoquines impermeables de hormigón en disposición permeable utilizados como capa de superficie permeable.

### 3.3.3 DESCRIPCIÓN DEL ENSAYO

#### 3.3.3.1 Condicionantes y etapas del ensayo

El objetivo de estos ensayos fue el análisis del comportamiento en infiltración de una sección de firme permeable en laboratorio a través de la determinación del tiempo que una gota de agua necesita para infiltrar a través de todo el sistema del firme permeable en función de la disposición o no de una capa de OASIS® dentro de la sección



con un espesor u otro. Para ello se hicieron ensayos utilizando la misma sección de firme permeable sin capa de OASIS® y con capa de OASIS® de 1,3 cm y 2,0 cm de espesor. De esta forma se pretendía cuantificar hidráulicamente las ventajas que aportaría la disposición de este material como capa de separación y filtro, frente a la práctica habitual de algunas compañías de pavimentos permeables en el Reino Unido de no colocar ninguna capa de separación y filtro entre la base y la sub-base de la estructura del firme permeable, o la opción de colocar una capa de geotextil. Ventajas como la posible aportación de un volumen de almacenamiento de agua de lluvia mayor y una mayor laminación del caudal pico del flujo efluente con respecto a una sección estándar de firme permeable.

Se simularon intensidades de lluvia de 100, 200 y 400 mm/h elegidas para cubrir un amplio espectro de intensidades de lluvia a nivel mundial, según el estudio del estado del arte de esta tesis (punto 2.2.2). Para medir la cantidad de agua infiltrada por toda la sección de las capas de firme permeable se utilizó una probeta como la que puede verse en la siguiente figura:

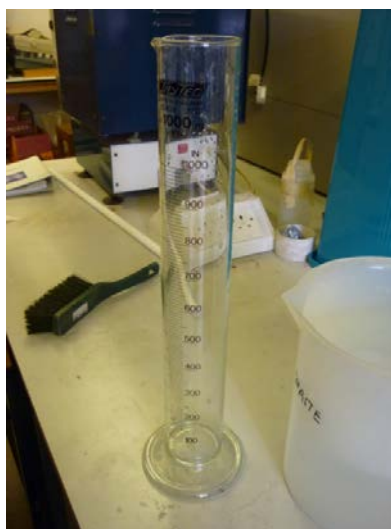


Figura 49. Probeta graduada para la medida del caudal infiltrado por toda la sección del firme permeable.

Todos los ensayos fueron realizados bajo las mismas condiciones de temperatura y humedad en laboratorio:

- Rango de temperatura: 14-18°C.
- Humedad: 60-70%.

Cada ensayo está dividido en tres etapas o fases principales:

- ❖ **Fase inicial.** Comienza con la aportación manual de agua en cada minuto, vertiendo 75, 150 y 300 ml/minuto para la simulación de 100, 200 y 400 mm/h de intensidad de lluvia respectivamente. Dicha fase queda dividida en dos sub-grupos a saber:
  - Sub-fase de concentración. Esta sub-fase está constituida por el tiempo que tarda una gota de agua de lluvia en infiltrar a través de la sección completa del firme permeable (tiempo de concentración), saliendo a través del tubo de plástico situado en la parte inferior del contenedor (Figura 44).
  - Sub-fase intermedia. Tiempo que tarda el agua infiltrada en alcanzar un flujo estacionario desde la aparición del caudal de agua en la tubería inferior (Figura 44). Durante esta fase se medirán las tasas de infiltración mediante el valor del flujo de agua que sale por el tubo de plástico por minuto.
- ❖ **Fase estacionaria.** Esta fase comienza cuando el flujo de agua alcanza una tasa de infiltración constante a través de la sección de firme permeable, definiéndose de esta manera un flujo estacionario. Esta fase marca el valor del pico de flujo efluente debido a la intensidad de lluvia simulada y el tiempo que tarda el sistema del firme permeable en alcanzar dicho pico en función de su estructura. Durante esta fase se miden igualmente las tasas de infiltración.
- ❖ **Fase de descarga.** Fase definida desde el cese de la aportación de agua a las secciones de firme permeable hasta el final del proceso de infiltración medible en las condiciones de este ensayo. Este final del proceso de infiltración vino determinado por un valor constante de flujo de agua por minuto inferior a 1 ml saliendo por el tubo inferior.

En el caso de las secciones de firmes permeables denominadas CONTROL (Tabla 11) la duración del evento de lluvia fue en todos los casos de 15 minutos, sirviendo de referencia para la comparación con las secciones de OASIS® de distinto espesor utilizadas (OASIS 1.3 y OASIS 2.0 definidas en la Tabla 11).

Sin embargo, en el caso de las secciones de OASIS®, la duración de cada ensayo fue variable entre los 30 y 60 minutos. De esta manera se pudo interpretar los distintos tiempos de duración como el número de eventos de lluvia de 15 minutos de cada

intensidad que serían necesarios de forma consecutiva para alcanzar cada estado o fase definida anteriormente, comparándolos con la sección de firme permeable CONTROL.

A modo de resumen de la metodología, en este ensayo se analizan las tasas de infiltración del firme permeable, obteniendo el volumen de almacenamiento de cada firme permeable, y se delimitan las fases de funcionamiento del OASIS®.

### 3.3.3.2 Variables del ensayo

Para analizar el comportamiento en infiltración de la nueva sección de firme propuesta en esta tesis y las ventajas que la misma puede aportar se seleccionaron las siguientes variables de estudio:

Variables independientes:

- **Intensidad de lluvia.** Esta variable está asociada al caudal de agua aportado a cada sección de firme permeable estudiada, siendo este de 75, 150 y 300 ml/minuto para simular 100, 200 y 400 mm/h de intensidad de lluvia.
- **Tiempo.** Medida del tiempo a lo largo del ensayo para la delimitación posterior de las distintas etapas estudiadas.

Variable dependiente:

- **Tasas de infiltración.** Medida del caudal de flujo (volumen por minuto) de agua efluente a través del tubo situado en la parte inferior de los contenedores de las distintas secciones de firmes permeables estudiadas.

Otras variables:

- **Volumen de agua utilizada.** Dicho volumen dependerá de las condiciones de cada sección de firme y el tiempo que necesite para alcanzar el flujo efluente estacionario.
- **Número de eventos de lluvia.** Número de eventos de lluvia necesario para alcanzar las distintas etapas definidas en función de la intensidad de lluvia y de la sección de firme permeable seleccionada.
- **Volumen de agua almacenada en la capa de OASIS®.** Volumen de agua que es capaz de retener el OASIS®.
- **Volumen de agua saliente.** Volumen de agua que infiltra por toda la

sección de firme permeable y sale por el tubo de plástico inferior.

- **Tiempo necesario para saturar el OASIS®.** Tiempo que necesita el OASIS® para quedar completamente saturado. Este tiempo viene determinado por el momento en que la sección de firme permeable que posee la capa de OASIS® alcanza el caudal punta, y por lo tanto, la etapa estacionaria de flujo de infiltración. Este tiempo determinará por tanto la laminación del caudal punta otorgado por la utilización de la capa de OASIS®.

Los fundamentos teóricos del ensayo de medida de las tasas de infiltración y de la escorrentía superficial de un pavimento permeable son también de aplicación para este ensayo, sumando la capa OASIS® y la capa sub-base al análisis.



### 3.4 ENSAYO DE MEDIDA DE LA DRENABILIDAD DE SUPERFICIES DE HORMIGÓN POROSO Y ASFALTO POROSO

#### 3.4.1 PERMEÁMETRO LABORATORIO CAMINOS SANTANDER

Tras el estudio del estado del arte, se seleccionó el Permeámetro del Laboratorio de Caminos de Santander (LCS) para la caracterización, tanto en laboratorio como en campo, de las superficies permeables compuestas por aglomerados porosos (hormigón o asfalto). Con esta base se planteó una comparativa entre superficies en laboratorio y en campo.

El LCS permite medir la capacidad de drenaje de una superficie porosa en función del tiempo que necesita dicha superficie para infiltrar una altura de agua determinada que se encuentra sobre ella (Figura 50). El ensayo mediante el LCS se hizo siguiendo la norma española NLT-327/00 (2000), a partir de la cual se desarrolló posteriormente la norma europea UNE-EN 12697-40:2013 de reciente aprobación y que anula la anteriormente norma UNE-EN 12697-40:2006. Esta norma europea describe el método para determinar la conductividad hidráulica relativa in-situ.



Figura 50. Permeámetro del Laboratorio Caminos Santander (LCS).

Este ensayo permite determinar la drenabilidad de un pavimento de carretera, sirviendo como método reconocido a nivel europeo para la comprobación de la drenabilidad de un pavimento con el paso del tiempo, y validando su correcto funcionamiento hidráulico como capa de rodadura permeable. El funcionamiento del dispositivo mostrado anteriormente consiste en el llenado completo del depósito

mediante agua limpia. Una vez lleno se retira el tapón de fondo y se cronometra el tiempo que tarda el volumen de agua entre las dos marcas extremas en percolar a través de la superficie permeable. Ese tiempo que tarda en pasar a través de la superficie de estudio será la conductividad hidráulica de la superficie o permeabilidad in-situ.

Este ensayo fue especialmente diseñado para el estudio de mezclas bituminosas en caliente. No obstante, el estudio llevado a cabo por Fernandez-Barrera et al. (2008) sobre la aplicación de este método en superficies de hormigón poroso, ha demostrado la posibilidad de utilizar este método como herramienta de medición de la conductividad hidráulica de este tipo de superficies permeables.

#### **3.4.2 CONSTRUCCIÓN DE LAS SUPERFICIES PERMEABLES Y DE LAS SECCIONES DE FIRMES PERMEABLES A ANALIZAR**

Las superficies permeables analizadas con el LCS en laboratorio fueron las mismas que fueron dispuestas en el ICF para la realización del ensayo de medida de la capacidad de infiltración en laboratorio de un pavimento permeable. Por lo tanto, su construcción ha sido previamente descrita (ver punto 3.2.2).

En el caso de las secciones de firmes permeables analizadas con el LCS en campo, estas fueron construidas como se indica en la tesis doctoral de Gómez-Ullate (2011) en el apartado de construcción del aparcamiento experimental del campus universitario de “Las Llamas”.

#### **3.4.3 DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYOS DE LABORATORIO**

Los ensayos de laboratorio sobre superficies permeables de aglomerado poroso (hormigón poroso y asfalto poroso) mediante el uso del permeámetro LCS tuvieron el objetivo de determinar la pérdida de la capacidad de infiltración de dichas superficies. Estos ensayos se realizaron en el Laboratorio de Caminos de la Universidad de Cantabria. Para alcanzar este objetivo se planteó la comparación de las superficies recién construidas con las superficies colmatadas con un leve mantenimiento tras haber sido ensayadas en el ICF. Por tanto, no se realizaron ensayos con el LCS sobre la superficie colmatada, y se esperó al final de los ensayos con el ICF para no influir en las condiciones

de colmatación previamente a la simulación del mantenimiento y el posterior ensayo en el ICF.

La metodología de ensayo para el LCS se diferenció en función del escenario de colmatación de la superficie permeable. En el caso de una superficie recién construida se tomó una medida con tres repeticiones en el punto central de ambas caras de la probeta de 50 cm x 50 cm antes de su ubicación en el ICF. Una vez ensayadas en el ICF, estas probetas fueron retiradas del mismo para ser ensayadas de nuevo con el LCS. En este último caso, se tomaron 24 puntos de medida con 3 repeticiones cada uno en la cara superior de la probeta, divididos en dos zonas principales (12 medidas por zona). Estas zonas vinieron determinadas por la influencia de la caída de las gotas de agua del ICF que limpiaron en parte las zonas donde cayeron sobre la superficie (zona lavada), dejando otras zonas con el sedimento prácticamente intacto (zona sin lavar) (Figura 51).



Figura 51. Zonas principales de medida con el LCS en laboratorio en las probetas de superficies permeable de aglomerado poroso utilizadas en el ICF (izquierda) y detalle de los sedimentos atrapados en las superficies.

#### 3.4.4 DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYOS DE CAMPO

Para el caso de los ensayos de campo se utilizó el permeámetro LCS para todas aquellas secciones de firme permeable del aparcamiento experimental de “Las Llamas” que tuvieran superficies permeables de aglomerado poroso: hormigón poroso y asfalto poroso. Cabe recordar que no se tienen datos iniciales del aparcamiento por no haberse realizado ensayos cuando dicho aparcamiento fue construido, y los cuales no fueron objeto obviamente de esta tesis. Por lo tanto, y con el objetivo de poder comparar los resultados obtenidos después de 5 años de funcionamiento en campo de dichas superficies, se realizaron los ensayos de laboratorio utilizando el LCS sobre las probetas

recién construidas de los materiales utilizados en las plazas de aparcamiento analizadas. Con estos ensayos se diagnosticó el estado de drenabilidad, y por tanto la capacidad de infiltración, tras 5 años desde su puesta en obra de estos firmes permeables. En la Figura 52 se muestran las 18 plazas de aparcamiento ensayadas con el LCS: 9 plazas de hormigón poroso y 9 plazas de asfalto poroso.



Figura 52. Imagen de las dos hileras de plazas de aparcamiento ensayadas con el LCS. Hormigón poroso reforzado con polímeros (margen izquierda de la imagen superior) y asfalto poroso (margen derecha de la imagen superior).

Cada plaza de aparcamiento fue dividida en 9 zonas diferentes de medición en función de su relación con el coche aparcado sobre ella, considerando que esta hipotéticamente pudiera influir sobre la capacidad de infiltración. Dichas zonas presentaban las siguientes características:

- **Zona 1.** Contacto estático entre la rueda delantera izquierda de los vehículos y el firme permeable del aparcamiento.
- **Zona 2.** Zona intermedia entre las zonas de contacto entre las ruedas delanteras de los vehículos y el firme permeable.
- **Zona 3.** Contacto estático entre la rueda delantera derecha de los vehículos y el firme permeable del aparcamiento.
- **Zona 4.** Zona intermedia entre las zonas de contacto de las ruedas delantera y trasera izquierdas de los vehículos y el firme permeable.
- **Zona 5.** Zona central de la plaza de aparcamiento.
- **Zona 6.** Zona intermedia entre las zonas de contacto de las ruedas delantera y trasera derechas de los vehículos y el firme permeable.

- **Zona 7.** Contacto estático entre la rueda trasera izquierda de los vehículos y el firme permeable del aparcamiento.
- **Zona 8.** Zona intermedia entre las zonas de contacto entre las ruedas traseras de los vehículos y el firme permeable.
- **Zona 9.** Contacto estático entre la rueda trasera derecha de los vehículos y el firme permeable del aparcamiento.

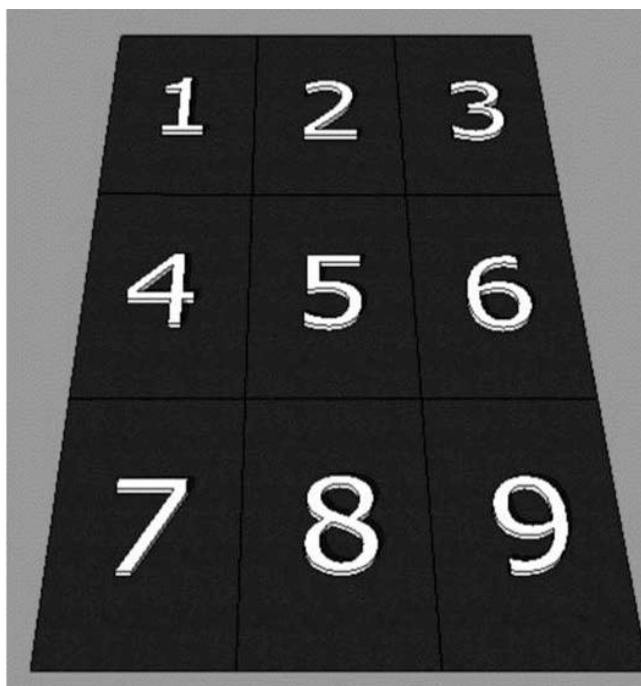


Figura 53. Zonas de estudio en cada plaza de aparcamiento.

Se calificarán además todas las zonas de cada plaza de aparcamiento en función de su permeabilidad equivalente según el criterio mostrado de Pérez y Calzada (1990), recogido en la Tabla 12.

Tabla 12. Tabla de calificaciones para una superficie permeable de aglomerado poroso en función del tiempo de medida del ensayo realizado con el permeámetro LCS.

Rango de tiempo medido en el LCS (segundos)	Permeabilidad equivalente (m/s)	Calificación
< 50	0,0050	Recién construida
50 - 100	0,0025	Apreciable
100 - 200	0,0013 – 0,0025	Regular
> 200	0,0013	Pobre o deficiente

En el caso del rango de calificación de recién construida, Pérez y Calzada (1990) hacen especial referencia a que preferiblemente el tiempo medido en el ensayo con el LCS sea de entre 25 y 35 segundos.

## **CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**





#### 4.1 ENSAYO DE MEDIDA DE LA CAPACIDAD DE INFILTRACIÓN DE UN PAVIMENTO PERMEABLE EN LABORATORIO

Es necesario recordar en este punto que se ensayaron en el Infiltrómetro Cántabro Fijo (ICF) 3 tipos distintos de pavimentos permeables con distintas superficies (adoquines impermeables con ranuras, hormigón poroso y asfalto poroso) bajo 3 escenarios de colmatación y probando 5 pendientes distintas. En todos los casos se utilizó el mismo material como capa de base y el mismo tipo de geotextil por debajo de él. Se utilizaron 3 probetas de cada superficie permeable excepto en el caso del hormigón poroso, en la que finalmente se utilizaron 5 probetas. De esta forma, el número total de ensayos fue de 155 repartidos de la siguiente forma:

- Adoquines impermeables con ranuras. Se realizaron un total de 45 ensayos, utilizando 3 probetas sometidas a 3 escenarios de colmatación y 5 pendientes distintas.
- Hormigón poroso. Se realizaron 65 ensayos, utilizando 5 probetas. Se realizaron 45 ensayos del mismo modo que en los adoquines, más 20 ensayos extra para poder obtener resultados que pudieran ser tratados estadísticamente de la misma forma que en las otras superficies, debido a la mayor variabilidad registrada en esta superficie.
- Asfalto poroso PA-16. Se llevaron a cabo 45 ensayos en total, utilizando 3 probetas sometidas a 3 escenarios de colmatación y 5 pendientes, al igual que en el caso de los adoquines impermeables.

##### 4.1.1 ANÁLISIS DE LAS TASAS DE INFILTRACIÓN DE UN PAVIMENTO PERMEABLE EN LABORATORIO

El número de total de resultados obtenidos de los ensayos con el ICF para las tasas de infiltración fue de 775 (5 mediciones por cada uno de los 155 ensayos, correspondientes a las 5 cámaras que recogen el agua infiltrada bajo cada probeta). Los resultados de este ensayo pueden verse en el Anexo 1.

Como análisis de partida se buscó la posible relación lineal, en caso de existir, entre la variable dependiente (infiltración acumulada -  $C_{IR}$ ) con las variables independientes de estudio (distancia de infiltración -  $R_{SL}$ , y pendiente de la superficie permeable -  $S_s$ ), además de con las superficies permeables utilizadas y los escenarios de

colmatación para los cuales se obtendrían dichos modelos. Para ello se realizó un análisis de correlación bivariada mediante el coeficiente conocido como Rho de Spearman incluyendo todas las superficies de estudio. Como resultado se obtuvo que tanto la superficie permeable utilizada como el escenario de colmatación estaban relacionados con la variable resultado de los modelos estadísticos (infiltración acumulada -  $C_{IR}$ ), siendo una correlación significativa al nivel 0,01 (bilateral) en el caso de la superficie permeable y la  $C_{IR}$ , y al nivel 0,05 (bilateral) en el caso del escenario de colmatación y la  $C_{IR}$  (Tabla 13). No obstante, cabe destacar que los valores de los coeficientes de correlación no son elevados, manifestando la influencia de alguna de las superficies sobre el análisis total. Este punto motivó un análisis posterior por superficies.

Tabla 13. Coeficientes de correlación bivariados obtenidos mediante el análisis con la Rho de Spearman.

		Superficie permeable	Escenario de colmatación	Distancia de infiltración ( $R_{SL}$ )	Pendiente de la superficie permeable ( $S_S$ )
<b>Infiltración acumulada (<math>C_{IR}</math>)</b>	Coeficiente				
	de	0,135**	-0,094*	0,785**	-0,429**
	correlación				
	Significación (Bilateral)	0,000	0,010	0,000	0,000
** La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).					
* La correlación es significativa al nivel 0,05 (bilateral).					

Igualmente, se puede apreciar en la Tabla 13 como tanto la variable distancia de infiltración ( $R_{SL}$ ) como la variable pendiente de la superficie permeable ( $S_S$ ) tienen una alta relación con la infiltración acumulada ( $C_{IR}$ ), siendo en ambos casos su relación significativa al nivel 0,01 (bilateral). Cabe destacar además los altos valores del coeficiente de correlación obtenidos para ambas variables en relación con la variable infiltración acumulada.

Por otra parte, a medida que aumenta la distancia de infiltración aumenta la infiltración acumulada, como prueba el signo positivo del valor del coeficiente de correlación en la Tabla 13, mientras que a medida que aumenta la pendiente de la superficie permeable disminuye la infiltración acumulada, como manifiesta el signo negativo del valor del coeficiente de correlación (Tabla 13). Dicho patrón de

comportamiento se comprobó de forma independiente para cada una de las superficies permeables (Tabla 14, Tabla 15 y Tabla 16).

Este tipo de análisis estadístico de las correlaciones bivariadas se particularizó para los casos específicos de cada superficie permeable estudiada en esta investigación, de forma que pudieran interpretarse de forma más correcta los bajos valores obtenidos en los coeficientes de correlación en la Tabla 13.

En el caso de los adoquines impermeables con ranuras, se observó que el escenario de colmatación influyó sobre la infiltración acumulada al estar correlacionada con ella con un valor medio-alto del coeficiente de correlación y siendo ésta significativa al nivel 0,01 (bilateral), como puede comprobarse en la Tabla 14.

Tabla 14. Coeficientes de correlación bivariados obtenidos mediante el análisis con la Rho de Spearman para la superficie permeable de adoquines impermeables con ranuras.

		Escenario de colmatación	Distancia de infiltración ( $R_{SL}$ )	Pendiente de la superficie permeable ( $S_s$ )
<b>Infiltración acumulada (<math>C_{IR}</math>)</b>	Coeficiente de correlación	-0,374**	0,717**	-0,424**
	Significación (Bilateral)	0,000	0,000	0,000
** La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).				

De la misma manera se puede constatar que tanto la distancia de infiltración como la pendiente de la superficie permeable están correlacionadas con la infiltración acumulada, mostrando además un alto valor del coeficiente de correlación y siendo ésta relación significativa al nivel 0,01 (bilateral) (Tabla 14).

Sin embargo, para el caso de la superficie permeable de hormigón poroso, el escenario de colmatación no resultó tener influencia en la infiltración acumulada como lo demuestra la inexistencia de correlación entre ambas variables (Tabla 15).

Tabla 15. Coeficientes de correlación bivariados obtenidos mediante el análisis con la Rho de Spearman para la superficie permeable de hormigón poroso.

		Escenario de colmatación	Distancia de infiltración ( $R_{SL}$ )	Pendiente de la superficie permeable ( $S_s$ )
<b>Infiltración acumulada (<math>C_{IR}</math>)</b>	Coeficiente de correlación	-0,040	0,823**	-0,428**
	Significación (Bilateral)	0,489	0,000	0,000
	** La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).			

La tendencia que se mantuvo inalterada con respecto a los casos anteriores (Tabla 13 y Tabla 14) fue la de una alta correlación entre las variables distancia de infiltración y pendiente de la superficie permeable con la infiltración acumulada, como puede comprobarse en la Tabla 15.

El mismo comportamiento que en la anterior superficie de hormigón poroso fue observado en la superficie permeable de asfalto poroso, no estando correlacionado el escenario de colmatación de la superficie con la infiltración acumulada, tal y como puede verse en la Tabla 16. Ambas superficies presentan similares características en cuanto a su porosidad (entre el 25 y el 30%), como puede verse en el apartado de materiales utilizados en la tesis. Dichas características pueden influir en el comportamiento en infiltración de ambas superficies de aglomerados porosos en los diferentes escenarios de colmatación, especialmente en el escenario de superficie colmatada y colmatada con mantenimiento. Por lo tanto, un primer punto de discusión llevaría a determinar que este tipo de superficies porosas no se ven afectadas de forma significativa por la simulación de colmatación llevada a cabo, como sí se vio afectada la superficie permeable de adoquines. No obstante, será necesario comprobar dicho punto una vez obtenidos los modelos de regresión lineal en los escenarios de superficie recién construida y superficie colmatada.

Tabla 16. Coeficientes de correlación bivariados obtenidos mediante el análisis con la Rho de Spearman para la superficie permeable de asfalto poroso PA-16.

		Escenario de colmatación	Distancia de infiltración ( $R_{SL}$ )	Pendiente de la superficie permeable ( $S_s$ )
<b>Infiltración acumulada (<math>C_{IR}</math>)</b>	Coeficiente de correlación	-0,032	0,835**	-0,441**
	Significación (Bilateral)	0,636	0,000	0,000
** La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).				

Una vez realizados los análisis estadísticos iniciales y después de observarse las relaciones existentes entre las variables de estudio ( $C_{IR}$ ,  $R_{SL}$ , y  $S_s$ ), se prosiguió con la generación de los modelos estadísticos explicativos del comportamiento de infiltración del agua de lluvia en cada superficie en función de su escenario de colmatación. Dada la falta de correlación existente entre el escenario de colmatación y la infiltración acumulada en las superficies permeables de aglomerados porosos (hormigón poroso y asfalto poroso, Tabla 15 y Tabla 16), se optó por obtener un modelo de regresión lineal para los dos escenarios de colmatación extremos estudiados en esta investigación: el caso de una superficie permeable recién colocada sin aporte de sedimentos y una superficie colmatada tras un evento de precipitación extrema. La influencia del mantenimiento se estudió separadamente de este análisis estadístico de forma descriptiva para todas las superficies. A pesar de no existir una correlación significativa entre los escenarios de colmatación extremos señalados con anterioridad en el caso de las superficies de aglomerado poroso, se decide generar ambos modelos de regresión lineal para poder compararlos con los obtenidos en el caso de la superficie de adoquines impermeables con ranuras.

Las variables independientes de los modelos de regresión lineal que se desarrollaron fueron la distancia de infiltración ( $R_{SL}$ ) y la pendiente de la superficie permeable ( $S_s$ ) al determinarse su alta correlación con la que es la variable dependiente de los modelos (infiltración acumulada –  $C_{IR}$ ) (Tabla 14, Tabla 15 y Tabla 16) para todos los tipos de superficie permeable.

Todos los modelos estadísticos de regresión lineal fueron obtenidos con un 95% de nivel de confianza y en todos ellos se cumplieron estrictamente los siguientes criterios estadísticos necesarios para la generación de una regresión lineal (consultar Anexo estadístico, donde quedan recogidas las comprobaciones para la obtención de los modelos):

- Análisis de colinealidad de variables.
- Independencia de las observaciones.
- Normalidad de los residuos no estandarizados de la variable dependiente.
- Homocedasticidad de variables.

#### 4.1.1.1 Modelos de regresión lineal para pavimentos permeables con superficies de adoquines con ranuras

El primer caso analizado a continuación en la Tabla 17 corresponde a un pavimento permeable de superficie de adoquines impermeables con ranuras.

Tabla 17. Modelos de regresión lineal obtenidos para el pavimento permeable con superficie de adoquines impermeables con ranuras con un nivel de confianza del 95%, y valores de la t de Student.

ESCENARIO DE COLMATACIÓN	MODELOS DE REGRESIÓN LINEAL	R <sup>2</sup>	t de Student		
			C	R <sub>SL</sub>	S <sub>s</sub>
<b>Superficie recién construida</b>	$C_{IR} = 10,256 + 2,049 \cdot R_{SL} - 3,255 \cdot S_s$	0,95	4,265	34,015	-13,001
<b>Superficie colmatada</b>	$C_{IR}^{1/2} = 1,336 + 0,156 \cdot R_{SL} - 0,368 \cdot S_s$	0,87	3,716	18,125	-9,865

La primera información que puede extraerse de la interpretación de los resultados mostrados en la Tabla 17 es la diferencia existente en el comportamiento en infiltración de la superficie de adoquines para los dos escenarios extremos de colmatación analizados, con una infiltración claramente menor en el caso del escenario de superficie colmatada. Este aspecto puede comprobarse igualmente en la Figura 54 correspondiente al escenario de superficie recién construida y en la Figura 55 para el caso del escenario de superficie colmatada.

El signo positivo de la variable distancia de infiltración ( $R_{SL}$ ) en ambos modelos de regresión significa que al aumentar el valor de dicha variable, aumentará el valor de la

infiltración acumulada ( $C_{IR}$ ), como ya se puso de manifiesto en el análisis de correlaciones bivariadas entre variables de estudio (Tabla 14). Por lo tanto, a mayor distancia de infiltración, mayor acumulación de volumen de agua infiltrada en la probeta de superficie permeable, en cualquiera de los escenarios de colmatación (Figura 54 y Figura 55). En el caso de la variable pendiente de la superficie ( $S_s$ ), un aumento de la misma conllevará una disminución de la infiltración acumulada ( $C_{IR}$ ), como indica el signo negativo de la variable  $S_s$  en ambos modelos. De esta manera, se registrará menos infiltración acumulada cuanto mayor sea la pendiente de la superficie, independientemente del escenario de colmatación (Figura 54 y Figura 55).

Los valores de la  $t$  de Student permiten además concluir que la variable más influyente en ambos modelos de regresión obtenidos para la superficie de adoquines fue la distancia de infiltración, presentando un valor 2,6 veces superior al valor de la pendiente de la superficie en el caso de la superficie recién colmatada, y 1,8 veces superior en el caso de la superficie colmatada. Esto supone que la longitud de un pavimento permeable influye más que la pendiente del mismo en cuanto a las tasas de infiltración, siempre y cuando las pendientes se encuentren entre 0 y 10%.

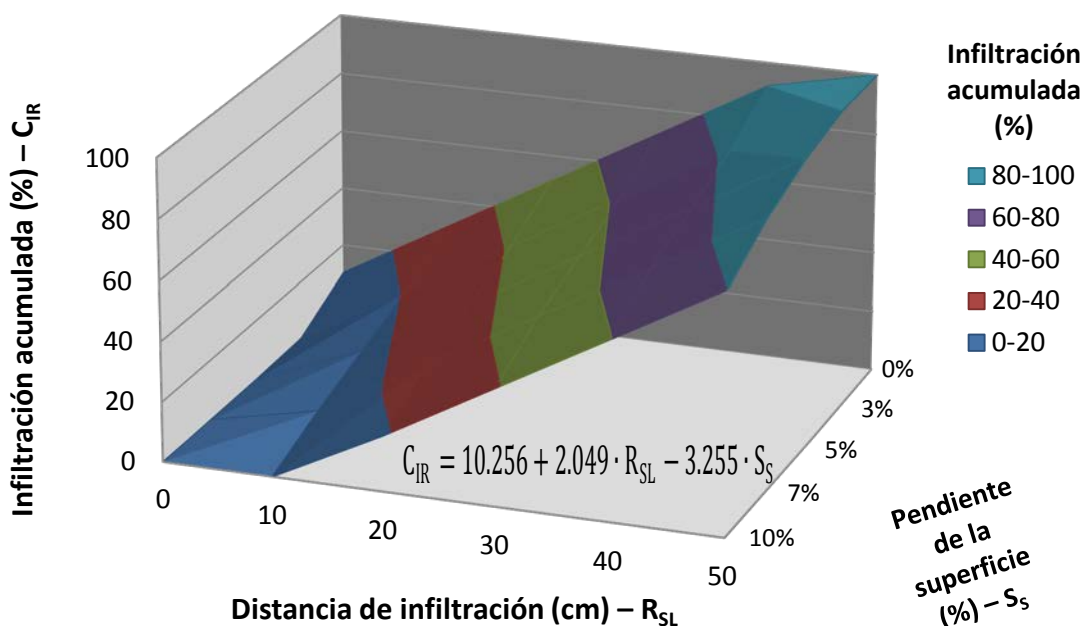


Figura 54. Representación en 3D del modelo de regresión lineal obtenido para un pavimento de superficie de adoquines impermeables de hormigón en disposición permeable recién construido.

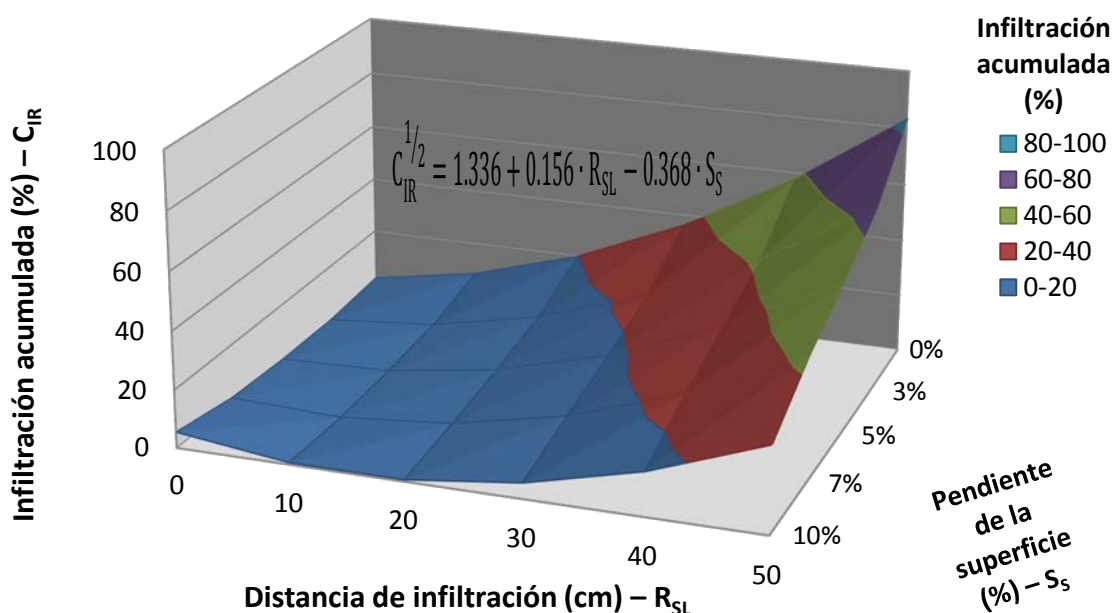


Figura 55. Representación en 3D del modelo de regresión lineal obtenido para un pavimento de superficie de adoquines impermeables de hormigón en disposición permeable colmatado.

En ambos escenarios se advierte un alto valor del  $R^2$  (0,95 en el caso de la superficie recién construida y 0,87 en el caso de la superficie colmatada), mostrando por tanto una baja variabilidad de los resultados obtenidos en el ICF y una alta representatividad de las variables independientes elegidas. Estos altos valores de  $R^2$  permiten además lograr una alta eficiencia en la predicción del comportamiento en infiltración de este tipo de superficie en laboratorio. Los sedimentos que colmatan la superficie analizada influyen en el aumento de la variabilidad de los resultados obtenidos con el ICF, representado a través de la bajada del valor de  $R^2$  para el modelo obtenido en el escenario de superficie colmatada, con lo que disminuye levemente la eficiencia predictiva del modelo. Aun así, la eficiencia sigue siendo elevada para un nivel de confianza del 95%. No obstante, cabe destacar en este punto que los datos obtenidos en el ICF para la superficie colmatada no satisficieron inicialmente las condiciones establecidas en los criterios estadísticos mostrados con anterioridad para la obtención de una regresión lineal. Por lo tanto, se hizo necesaria la transformación de la variable dependiente infiltración acumulada ( $C_{IR}$ ). Dicha transformación fue calculada mediante el uso de los diagramas de dispersión de la variable dependiente para cada variable independiente ( $R_{SL}$  y  $S_S$ ), resultando como potencia para la transformación la aplicación de la raíz cuadrada a la  $C_{IR}$  (Tabla 17 y Figura 55).



La influencia de la constante en ambos modelos de regresión lineal es baja como muestran los valores de la *t* de Student obtenidos en la Tabla 17, dando mayor consistencia aún a la bondad predictiva de ambos modelos.

El rango de validez de ambos modelos de regresión lineal está determinado por la no aceptación en términos físicos e hidráulicos de valores matemáticos negativos de la infiltración acumulada como límite inferior, y de valores superiores al 100% de la misma como límite superior. Por lo tanto, esta interpretación de los resultados desde un punto de vista hidráulico determina que los rangos de validez para el modelo de la superficie recién construida son los indicados en la Tabla 18.

Tabla 18. Rango de validez del modelo de regresión lineal de la superficie de adoquines impermeables con ranuras para el escenario de superficie recién construida.

Infiltración acumulada (%) - $C_{IR}$	Distancia de infiltración (cm) - $R_{SL}$					
Pendiente de la superficie (%) - $S_s$	0	10	20	30	40	50
0	10,26	30,75	51,24	71,73	92,22	<b>112,71</b>
3	0,49	20,98	41,47	61,96	82,45	<b>102,94</b>
5	<b>-6,02</b>	14,47	34,96	55,45	75,94	96,43
7	<b>-12,53</b>	7,96	28,45	48,94	69,43	89,92
10	<b>-22,29</b>	<b>-1,80</b>	18,69	39,18	59,67	80,16

Los valores destacados en negrita en la Tabla 18 muestran las zonas para las que el modelo de regresión lineal propuesto en laboratorio no tiene validez hidráulica. Dichas zonas pueden apreciarse igualmente en la Figura 54 en aquellos puntos con valor de la infiltración acumulada ( $C_{IR}$ ) iguales a 0 y a 100%. Las zonas de invalidez se encuentran concentradas en las zonas caracterizadas por distancias de infiltración nulas para pendientes de la superficie altas ( $\geq 5\%$ ) en el caso del límite inferior (valores de  $C_{IR}$  inferiores a 0%), y para las distancias de infiltración de valor 50 y pendientes de la superficie bajas ( $\leq 3\%$ ) en el caso del límite superior ( $C_{IR} \geq 100\%$ ) (Tabla 18 y Figura 54).

En el caso del modelo para la superficie colmatada, no existe ningún valor negativo debido a la influencia de la raíz cuadrada sobre la variable dependiente (Tabla 17). Por lo tanto no existe rango de invalidez en el límite inferior. En cuanto al límite superior (100% de la infiltración acumulada), no se obtuvo ningún valor que lo superase, siendo el máximo valor obtenido de 83,47% (Figura 55). Por lo tanto, todos los puntos están dentro del rango de validez con este modelo.

#### 4.1.1.2 Modelos de regresión lineal para pavimentos permeables con superficies de hormigón poroso reforzado con polímeros

Una vez analizados los modelos obtenidos para el pavimento de superficie de adoquines, se prosigue con el análisis de los modelos de regresión lineal generados para la superficie de hormigón poroso en los escenarios de colmatación de superficie recién construida y superficie colmatada (Tabla 19).

Tabla 19. Modelos de regresión lineal obtenidos para el pavimento permeable con superficie de hormigón poroso con un nivel de confianza del 95%, y valores de la t de Student.

ESCENARIO DE COLMATACIÓN	MODELOS DE REGRESIÓN LINEAL	R <sup>2</sup>	t de Student		
			C	R <sub>SL</sub>	S <sub>S</sub>
Superficie recién construida	$C_{IR} = 6,262 + 2,074 \cdot R_{SL} - 3,774 \cdot S_S$	0,85	1,438	18,637	-8,168
Superficie colmatada	$C_{IR} = 7,741 + 2,094 \cdot R_{SL} - 4,158 \cdot S_S$	0,88	1,994	21,164	-10,007

Un primer punto de discusión que puede extraerse es la gran similitud que existe entre ambos modelos presentados en la Tabla 19. Este punto viene a reafirmar la falta de diferencias existente entre los distintos escenarios de colmatación para las superficies de hormigón poroso (Tabla 15). Otra prueba de la falta de influencia de la colmatación de la superficie de hormigón poroso siguiendo los métodos de colmatación empleados en esta tesis, es la alta similitud entre los valores de R<sup>2</sup> de ambos modelos. La aplicación de sedimentos no ha hecho aumentar la variabilidad de los resultados (descenso del valor de R<sup>2</sup>), a diferencia de lo ocurrido para la superficie de adoquines con ranuras (Tabla 17). Este hecho viene a reafirmar la mayor resistencia a la colmatación que presenta la superficie de hormigón poroso frente a la de adoquines.

Como ya ocurriera con las superficies de adoquines, la influencia de la constante en los modelos obtenidos para ambos escenarios de colmatación fue muy baja según los valores obtenidos para la  $t$  de Student en la Tabla 25. Este hecho corrobora la alta eficiencia y validez de los modelos de regresión lineal para la superficie de hormigón poroso reforzado con polímeros. El signo positivo en la distancia de infiltración, tanto en el modelo de regresión como para la  $t$  de Student implica que un aumento en su valor provoca un aumento en el valor de la infiltración acumulada en todos los casos (Figura 56 y Figura 57). Sin embargo, el signo negativo de la pendiente de la superficie en el modelo de regresión y en el valor de la  $t$  de Student determina que al aumentar la pendiente de la superficie, disminuirá el valor de la infiltración acumulada, tal y como ocurría en el caso de las superficie de adoquines con ranuras (Figura 56 y Figura 57).

El estudio de la  $t$  de Student determina además que la variable independiente que más influencia tiene en ambos modelos de regresión para la superficie de hormigón poroso es la distancia de infiltración, siendo su valor 2,3 veces superior al valor de la pendiente de la superficie en el caso de la superficie recién construida y de 2,1 en el caso de la superficie colmatada (Tabla 25). Dicha relación entre las variables independientes es mayor en el caso de los adoquines para una superficie recién construida, lo que indica una mayor influencia de la variable distancia de infiltración en los modelos de dicha superficie. Por el contrario, dicha relación es mayor en el caso de la superficie de hormigón poroso para una superficie colmatada, siendo por tanto la influencia de la variable distancia de infiltración mayor en el modelo del hormigón poroso.

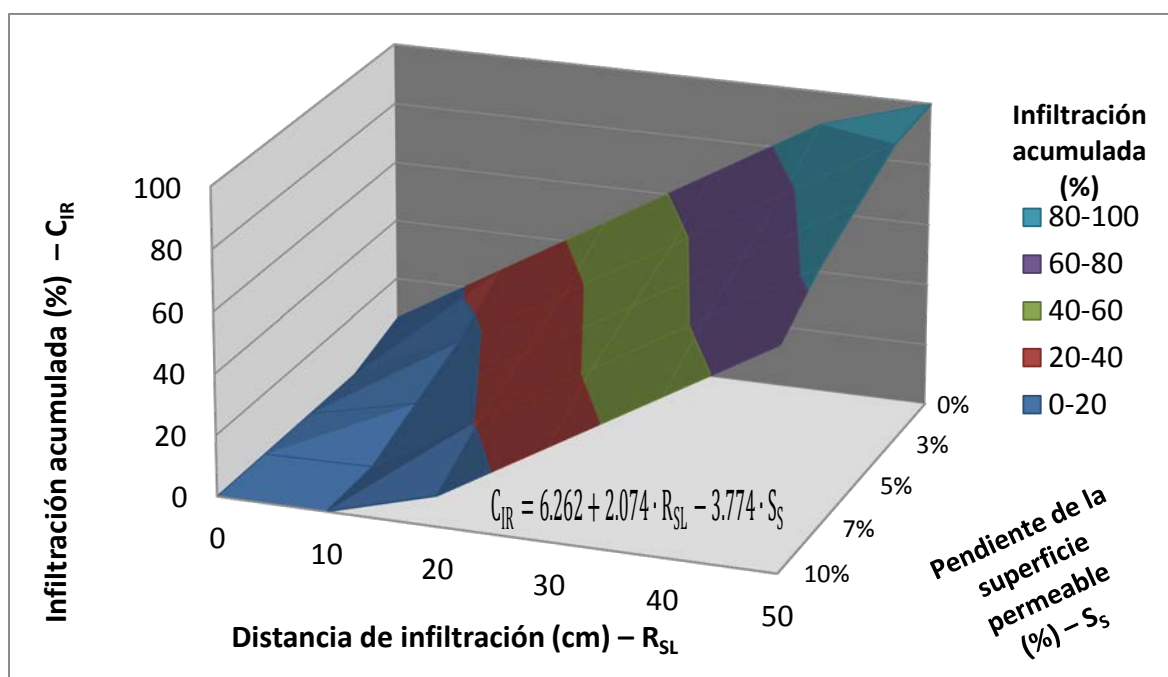


Figura 56. Representación en 3D del modelo de regresión lineal obtenido en la Tabla 25 para un pavimento de superficie permeable de hormigón poroso reforzado con polímeros recién construido.

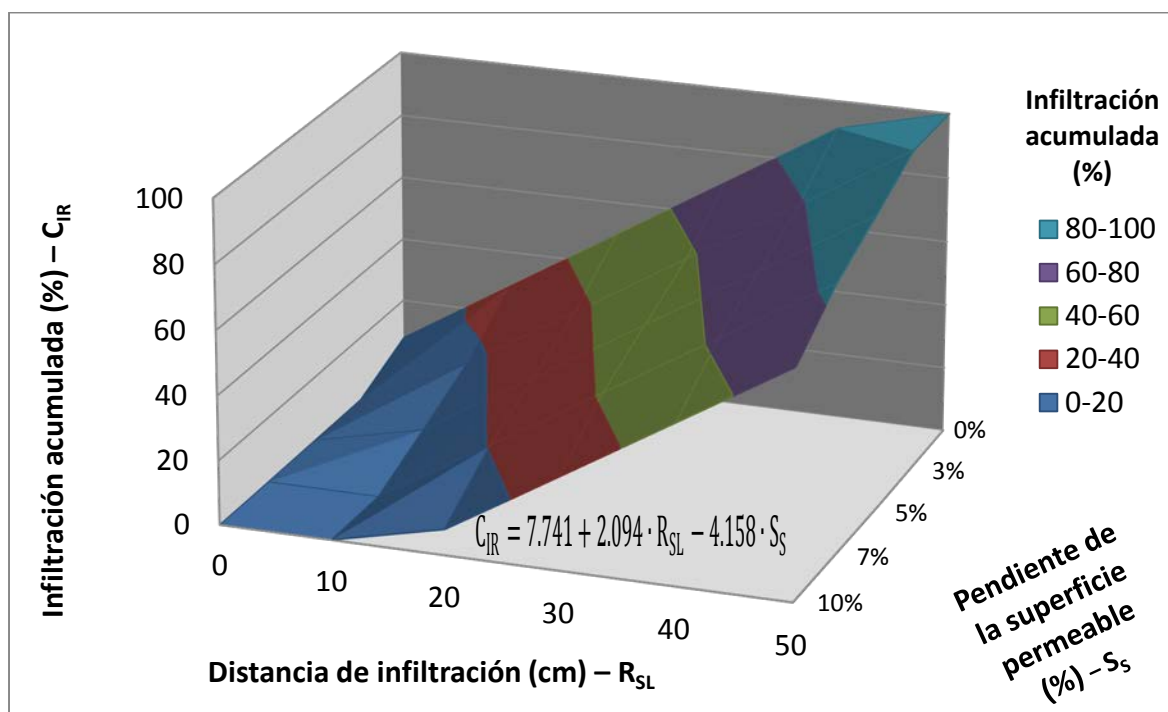


Figura 57. Representación en 3D del modelo de regresión lineal obtenido en la Tabla 25 para un pavimento de superficie permeable de hormigón.

Como puede identificarse en la Figura 56 y en la Figura 57, existen zonas donde los valores obtenidos con los modelos de región lineal de la Tabla 25 no tienen validez desde un punto de vista hidráulico. Estas zonas corresponden a aquellos puntos con valor de la infiltración acumulada ( $C_{IR}$ ) inferiores a 0 o superiores a 100%. A continuación, se muestran los rangos de validez del modelo de regresión para el pavimento permeable ejecutado con una superficie de hormigón poroso reforzado con polímeros en un escenario de colmatación de superficies recién construida (Tabla 22). Se identificarán las zonas donde el modelo carece de validez destacando en negrita las mismas.

Tabla 20. Rango de validez del modelo de regresión lineal de la superficie de hormigón poroso reforzado con polímeros para el escenario de superficie recién construida.

<b>Infiltración acumulada (%) - <math>C_{IR}</math></b>	<b>Distancia de infiltración (cm) - <math>R_{SL}</math></b>					
<b>Pendiente de la superficie (%) - <math>S_s</math></b>	<b>0</b>	<b>10</b>	<b>20</b>	<b>30</b>	<b>40</b>	<b>50</b>
<b>0</b>	6,26	27,00	47,74	68,48	89,22	<b>109,96</b>
<b>3</b>	<b>-5,06</b>	15,68	36,42	57,16	77,90	98,64
<b>5</b>	<b>-12,61</b>	8,13	28,87	49,61	70,35	91,09
<b>7</b>	<b>-20,16</b>	0,58	21,32	42,06	62,80	83,54
<b>10</b>	<b>-31,48</b>	<b>-10,74</b>	10,00	30,74	51,48	72,22

Las zonas que se encuentran concentradas en la distancia 0 y en las pendientes a partir del 3% quedan fuera del rango de validez por debajo del límite inferior (valor de la infiltración acumulada por debajo del 0%) para la superficie recién construida. En el otro extremo del límite de validez superior (valores de la infiltración acumulada por encima de 100%), la combinación de la distancia máxima de 50 cm y la pendiente mínima del 0% se encuentra fuera del rango de validez.

En el escenario de la superficie de hormigón poroso colmatada, los rangos de validez del modelo mostrado en la Tabla 25 son los siguientes (Tabla 26):

Tabla 21. Rango de validez del modelo de regresión lineal de la superficie de hormigón poroso reforzado con polímeros para el escenario de superficie colmatada.

<b>Infiltración acumulada (%) - <math>C_{IR}</math></b>	<b>Distancia de infiltración (cm) - <math>R_{SL}</math></b>					
<b>Pendiente de la superficie (%) - <math>S_s</math></b>	<b>0</b>	<b>10</b>	<b>20</b>	<b>30</b>	<b>40</b>	<b>50</b>
<b>0</b>	7,74	26,68	49,62	70,56	91,50	<b>112,44</b>
<b>3</b>	<b>-4,73</b>	16,21	37,15	58,09	79,03	99,97
<b>5</b>	<b>-13,05</b>	7,89	28,83	49,77	70,71	91,65
<b>7</b>	<b>-21,37</b>	<b>-0,43</b>	20,52	41,45	62,40	83,34
<b>10</b>	<b>-33,84</b>	<b>-12,90</b>	8,04	28,98	49,92	70,86

Por lo tanto, las zonas de concentración de puntos fuera del rango de validez del modelo de regresión lineal obtenido en la Tabla 25 se encuentran principalmente en la distancia 0 y las pendientes de la superficie superiores al 3% para el límite inferior (valores de infiltración por debajo del 0%). También para una distancia de 10 cm y pendientes superiores al 7% se detecta igualmente una zona de invalidez del modelo al quedar los valores de la infiltración acumulada predichos por el mismo por debajo del 0% (Figura 56 y Figura 57). En el otro extremo, respecto al límite de validez superior (valores de la infiltración acumulada por encima de 100%), la combinación de la distancia máxima de 50 cm y la pendiente mínima del 0% se encuentra fuera del rango de validez, como ya ocurrió para la superficie recién construida.

#### 4.1.1.3 Modelos de regresión lineal para pavimentos permeables con superficies de asfalto poroso

A continuación se realiza el análisis de la superficie de asfalto poroso. Los modelos de regresión lineal calculados a partir de los resultados aparecen reflejados en la Tabla 22.

Tabla 22. Modelos de regresión lineal obtenidos para el pavimento permeable con superficie de asfalto poroso Pa-16 con un nivel de confianza del 95%, y valores de la t de Student.

ESCENARIO DE COLMATACIÓN	MODELOS DE REGRESIÓN LINEAL	R <sup>2</sup>	t de Student		
			C	R <sub>SL</sub>	S <sub>S</sub>
Superficie recién construida	$C_{IR} = 8,868 + 2,044 \cdot R_{SL} - 4,406 \cdot S_S$	0,87	1,963	17,805	-11,302
Superficie colmatada	$C_{IR}^{1/2} = 1,324 + 0,213 \cdot R_{SL} - 0,436 \cdot S_S$	0,89	3,565	22,406	-11,057

Se observa una diferencia clara entre el modelo de regresión lineal para una superficie recién construida y para una superficie colmatada (Tabla 22). Dicha diferencia estriba en que para el caso de la superficie colmatada, la influencia de los sedimentos no permitió cumplir con todos los requisitos necesarios para la obtención de la regresión, teniéndose que aplicar una transformación a la variable dependiente. Esta transformación se determinó mediante el resultado obtenido en la potencia transformada dentro del análisis de dispersión. La transformación consistió en la raíz cuadrada de la variable dependiente, como ya ocurriera en el caso de la superficie de adoquines con ranuras.

El valor de R<sup>2</sup> en ambos modelos es elevado, al igual que en las otras superficies permeables estudiadas, mostrando un alto nivel de eficiencia en la predicción de los resultados de la infiltración acumulada mediante los modelos mostrados en la Tabla 22. En ambos escenarios de colmatación se observa una baja variabilidad de los resultados, no provocando un aumento de la variabilidad la aplicación de los sedimentos, lo que indica, como ya ocurriera con las superficie de hormigón poroso, que la superficie de asfalto poroso presenta una mayor resistencia a la colmatación que la superficie de adoquines. Por tanto, se puede concluir que las superficies de aglomerados porosos presentan una mayor resistencia a la colmatación que las superficies de adoquines bajo las condiciones particulares de este ensayo.

Los valores de la t de Student para la constante de los modelos obtenidos en la Tabla 22 son bajos, y por tanto no presentan una alta influencia en los modelos estadísticos obtenidos. Los altos valores de R<sup>2</sup> muestran a su vez la alta eficiencia predictiva de los modelos. Como ya se señaló para las anteriores superficies permeables,

la variable independiente distancia de infiltración fue la que tuvo una mayor influencia en los modelos de regresión obtenidos para la superficie de asfalto poroso, independientemente de su escenario de colmatación. Así, para un escenario de colmatación de superficie recién construida, el valor de la *t* de Student de la variable distancia de infiltración es 1,6 veces superior que el valor de la pendiente de la superficie. En el caso de la superficie colmatada esta relación aumenta hasta 2 veces, demostrando mayor influencia aún la variable distancia de infiltración tras la aplicación de los sedimentos, como ocurría también en las otras dos superficies ensayadas. Los valores obtenidos en este caso para la relación entre ambas variables independientes son algo inferiores que en el caso de la superficie de adoquines con ranuras y la superficie de hormigón poroso. Esto indica una mayor influencia de la variable distancia de infiltración en el caso de las superficies de adoquines con ranuras y hormigón poroso.

Las tendencias marcadas por los signos de los valores de la *t* de Student en la Tabla 22 para las variables independientes de los modelos de regresión lineal, mantienen el mismo comportamiento que los observados en las anteriores superficies permeables. Por tanto, se comprueba estadísticamente que un aumento de la distancia de infiltración provoca un aumento en el valor de la infiltración acumulada, mientras que un aumento en la pendiente de la superficie conlleva una disminución en los valores de la infiltración acumulada. Esta tendencia puede visualizarse de forma clara en la Figura 58 y en la Figura 59.



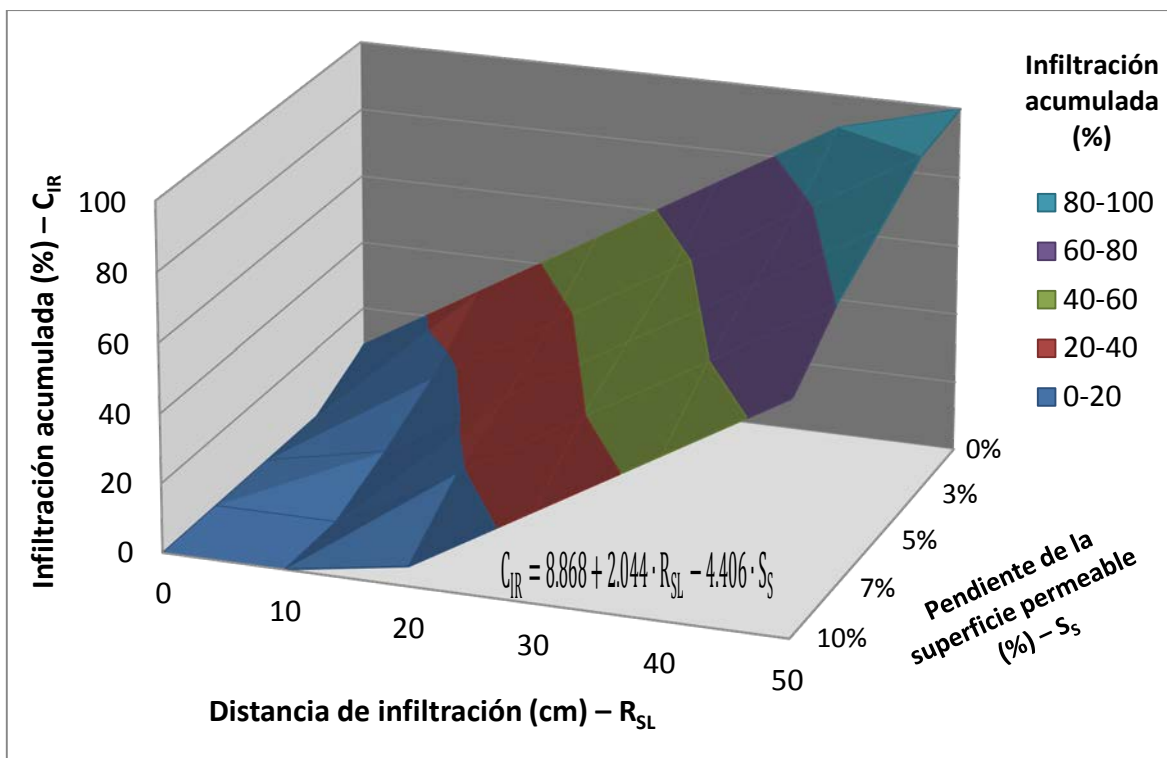


Figura 58. Representación en 3D del modelo de regresión lineal obtenido en la Tabla 22 para un pavimento de superficie permeable de asfalto poroso recién construido.

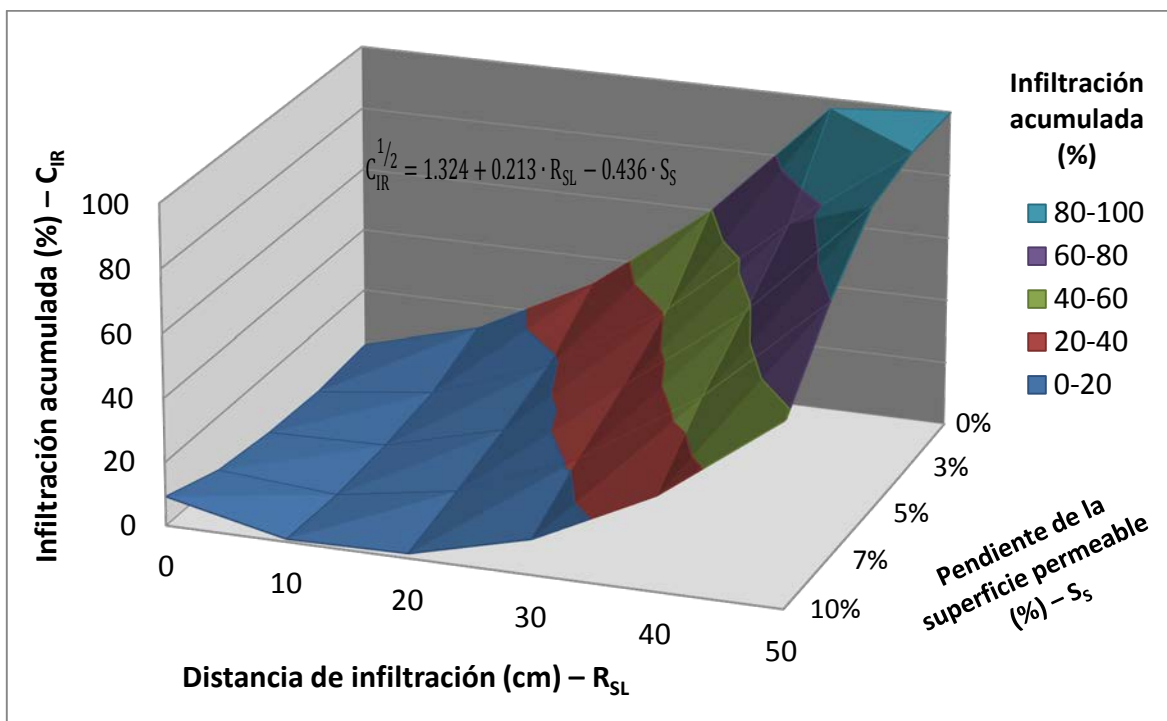


Figura 59. Representación en 3D del modelo de regresión lineal obtenido en la Tabla 22 para un pavimento de superficie permeable de asfalto poroso colmatado.

En la Figura 58 y en la Figura 59 se aprecian las zonas de validez de los modelos de regresión lineal desarrollados para la superficie de asfalto poroso en los escenarios de superficie recién construida y superficie colmatada. Dichas zonas quedan delimitadas en **negrita** en la Tabla 23.

Tabla 23. Rango de validez del modelo de regresión lineal de la superficie de asfalto poroso para el escenario de superficie recién construida.

<b>Infiltración acumulada (%) - <math>C_{IR}</math></b>	<b>Distancia de infiltración (cm) - <math>R_{SL}</math></b>					
<b>Pendiente de la superficie (%) - <math>S_s</math></b>	<b>0</b>	<b>10</b>	<b>20</b>	<b>30</b>	<b>40</b>	<b>50</b>
<b>0</b>	8,87	29,31	49,75	70,19	90,63	<b>111,07</b>
<b>3</b>	<b>-4,35</b>	16,09	36,53	56,97	77,41	97,85
<b>5</b>	<b>-13,16</b>	7,28	27,72	48,16	68,60	89,04
<b>7</b>	<b>-21,97</b>	<b>-1,53</b>	18,91	39,35	59,79	80,23
<b>10</b>	<b>-35,19</b>	<b>-14,75</b>	5,67	26,13	46,57	67,01

Las zonas que quedan fuera del rango de validez hidráulico del modelo de regresión lineal para un escenario de superficie recién construida, por estar por debajo del límite inferior (valor de la infiltración acumulada menor de 0%) son aquellas localizadas para un valor 0 de la distancia de infiltración y una pendiente de la superficie mayor o igual al 3% (Tabla 23). También quedan fuera de rango por el mismo motivo los puntos con valor 10 cm de distancia de infiltración y pendiente de superficie mayor o igual al 7% (ver Tabla 23). Existe otra zona más reducida que queda fuera del rango de validez hidráulico, la cual queda localizada para una distancia de infiltración de 50 cm y una pendiente de la superficie de 0% (Tabla 23). En este caso, el punto queda fuera de rango por superar el valor límite superior de 100% para la infiltración acumulada, como puede verse en la Figura 58.

En el caso de la superficie del modelo obtenido en la Tabla 22 para el asfalto poroso con un escenario de colmatación de superficie colmatada, los rangos de validez quedan marcados en **negrita** en la Tabla 24.

Tabla 24. Rango de validez del modelo de regresión lineal de la superficie de asfalto poroso para el escenario de superficie colmatada.

<b>Infiltración acumulada (%) - <math>C_{IR}</math></b>	<b>Distancia de infiltración (cm) - <math>R_{SL}</math></b>					
<b>Pendiente de la superficie (%) - <math>S_s</math></b>	<b>0</b>	<b>10</b>	<b>20</b>	<b>30</b>	<b>40</b>	<b>50</b>
<b>0</b>	1,75	11,93	31,18	59,51	96,90	<b>143,38</b>
<b>3</b>	0,00	4,61	18,28	41,04	72,86	<b>113,76</b>
<b>5</b>	0,73	1,62	11,59	30,63	58,74	95,92
<b>7</b>	2,99	0,16	6,41	21,73	46,13	79,60
<b>10</b>	9,22	0,82	1,50	11,25	30,07	57,97

En este caso no existen problemas con el límite inferior al no existir ningún valor de la infiltración acumulada menor de 0%, gracias a la transformación que le fue aplicada a la variable dependiente. No obstante, sí existirá una zona de no validez concentrada para valores de la distancia de infiltración de 50 cm y pendientes de la superficie inferiores o iguales al 3% (ver Tabla 24). Por lo tanto, la zona de validez queda delimitada al límite superior (valores de la infiltración acumulada superiores al 100%), como puede comprobarse en la Figura 59.

#### 4.1.2 ANÁLISIS DE LA ESCORRENTÍA DE UN PAVIMENTO PERMEABLE EN LABORATORIO

Dentro del ensayo realizado con el ICF para probetas de pavimento permeable, se obtuvieron resultados sobre la capacidad de infiltración de las mismas, medida a través de la escorrentía superficial residual. Dichos resultados vienen representados por los valores medidos del volumen de escorrentía superficial residual registrados en porcentaje sobre el total del volumen de agua utilizada en el ensayo en función de la pendiente de la superficie permeable. Los resultados de este ensayo pueden verse en el Anexo 1.

El primer análisis que se llevó a cabo fue la comprobación de la existencia o no de una correlación entre la escorrentía superficial residual, el tipo de superficie permeable, el escenario de colmatación y la pendiente de la superficie permeable, respectivamente.

Para el caso del escenario de colmatación se tuvieron en cuenta los tres escenarios descritos anteriormente: superficie recién construida, superficie colmatada y superficie colmatada con mantenimiento. Los resultados de este análisis pueden verse en la Tabla 25.

Tabla 25. Coeficientes de correlación bivariados obtenidos mediante el análisis con la Rho de Spearman.

		Superficie permeable	Escenario de colmatación	Pendiente de la superficie permeable ( $S_s$ )
<b>Escorrentía superficial residual (<math>R_R</math>)</b>	Coeficiente de correlación	-0,652**	0,264**	0,501**
	Significación (Bilateral)	0,000	0,002	0,000
** La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).				

Se comprueba que existe una alta correlación entre la escorrentía superficial y el tipo de superficie permeable, el escenario de colmatación y la pendiente de la superficie permeable, como ponen de manifiesto los valores de los coeficientes de correlación de la Tabla 25, siendo en todos los casos significativa al nivel 0,01 (bilateral). Además, cabe destacar dos puntos fundamentales. El primero de ellos es que el nivel de correlación más alto observado fue el de la superficie permeable. El segundo fue que el signo positivo del coeficiente de correlación entre la escorrentía superficial residual y la pendiente de la superficie (Tabla 25), lo cual confirma que a mayor pendiente, mayor será la escorrentía superficial residual.

#### 4.1.2.1 Pavimento permeable con una superficie de adoquines con ranuras

El siguiente paso del análisis consistió en el estudio de la existencia o no de correlación de la escorrentía superficial residual con el escenario de colmatación y con la pendiente de la superficie permeable, para el caso del pavimento permeable con superficie de adoquín con ranuras. Los resultados que se obtuvieron en dicho análisis de las correlaciones bivariadas para un nivel de confianza del 99% se muestran en la Tabla 26.

Tabla 26. Coeficientes de correlación bivariados obtenidos mediante el análisis con la Rho de Spearman para la superficie de adoquines con ranuras.

		Escenario de colmatación	Pendiente de la superficie permeable (S <sub>s</sub> )
<b>Escurrentía superficial residual (R<sub>R</sub>)</b>	Coeficiente de correlación	-0,652**	0,503**
	Significación (Bilateral)	0,000	0,000
** La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).			

Se comprueba una alta correlación de la escurrentía superficial residual con el escenario de colmatación y con la pendiente de la superficie permeable, manteniendo la misma tendencia mostrada en la Tabla 25, referente a todas las superficies permeables. Por lo tanto, la influencia del escenario de colmatación sobre el valor de la escurrentía superficial residual es muy alta, manifestándose igualmente una fuerte influencia de la superficie permeable sobre dichos valores de la escurrentía superficial residual. Esta influencia del escenario de colmatación sobre la escurrentía superficial reafirma la validez del método de adición de sedimentos empleado para esta superficie. Nuevamente, el signo positivo del valor del coeficiente de correlación bivariada entre la pendiente de la superficie y la escurrentía residual (Tabla 26) confirma que, sea cual sea el estado de la superficie, a mayor pendiente se obtendrá mayor escurrentía superficial residual (Figura 60).

Por otra parte, el signo negativo del coeficiente de correlación entre la escurrentía superficial residual y el escenario de colmatación (Tabla 26) indica fundamentalmente que la escurrentía depende más del estado de colmatación de la superficie que de la pendiente, debido al mayor valor absoluto del coeficiente de correlación. Además, y debido a la forma en que se consideraron los distintos escenarios de colmatación, o mejor dicho su orden en el análisis estadístico (sin colmatar, colmatado y colmatado con mantenimiento, en este orden), indica una recuperación en la capacidad de infiltración de la superficie de adoquines tras realizarse la simulación de las labores de mantenimiento. Esta tendencia se puede comprobar con claridad en la Figura 60.

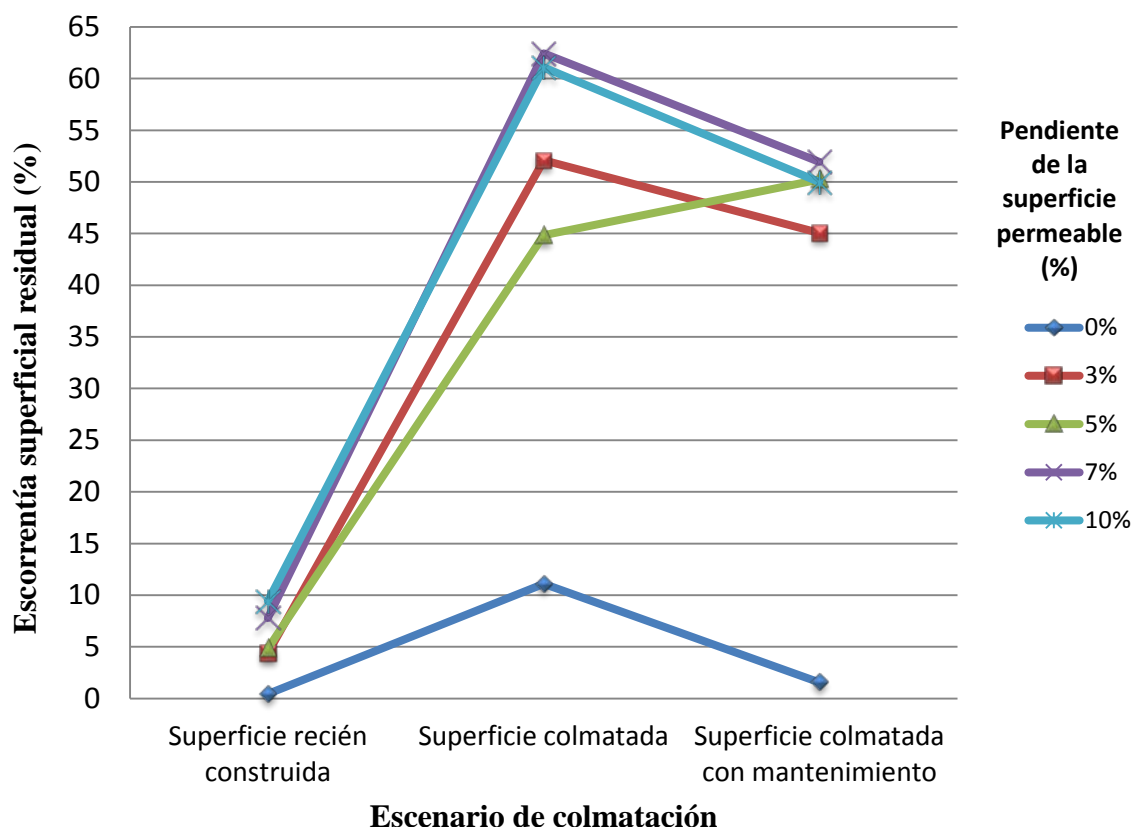


Figura 60. Valor de la escorrentía superficial residual (%) en función del escenario de colmatación y la pendiente de la superficie permeable para un pavimento permeable ejecutado mediante una superficie de adoquines.

Se observa en todos los casos dados por las diferentes pendientes de la superficie permeable de adoquines que la aplicación de las labores de mantenimiento provoca una recuperación de la capacidad de infiltración de un 10%. Esta tendencia queda puesta de manifiesto de una forma aún más clara en la Figura 61, donde las líneas que representan los escenarios de la superficie colmatada y colmatada con mantenimiento son casi paralelas.

El aumento de la escorrentía superficial residual que se registró para la pendiente del 5% tras las labores de mantenimiento puede explicarse teniendo en cuenta que con dichas labores no solo se eliminó una pequeña parte superficial de los sedimentos situados en las juntas de los adoquines, sino que además, en este caso particular, la energía cinética del barrido contribuyó a aumentar el grado de compactación de los sedimentos restantes en el interior de las juntas entre adoquines. Este hecho solo se produjo en este tipo de superficie, debido a su carácter diferenciador con el resto de superficies estudiadas.

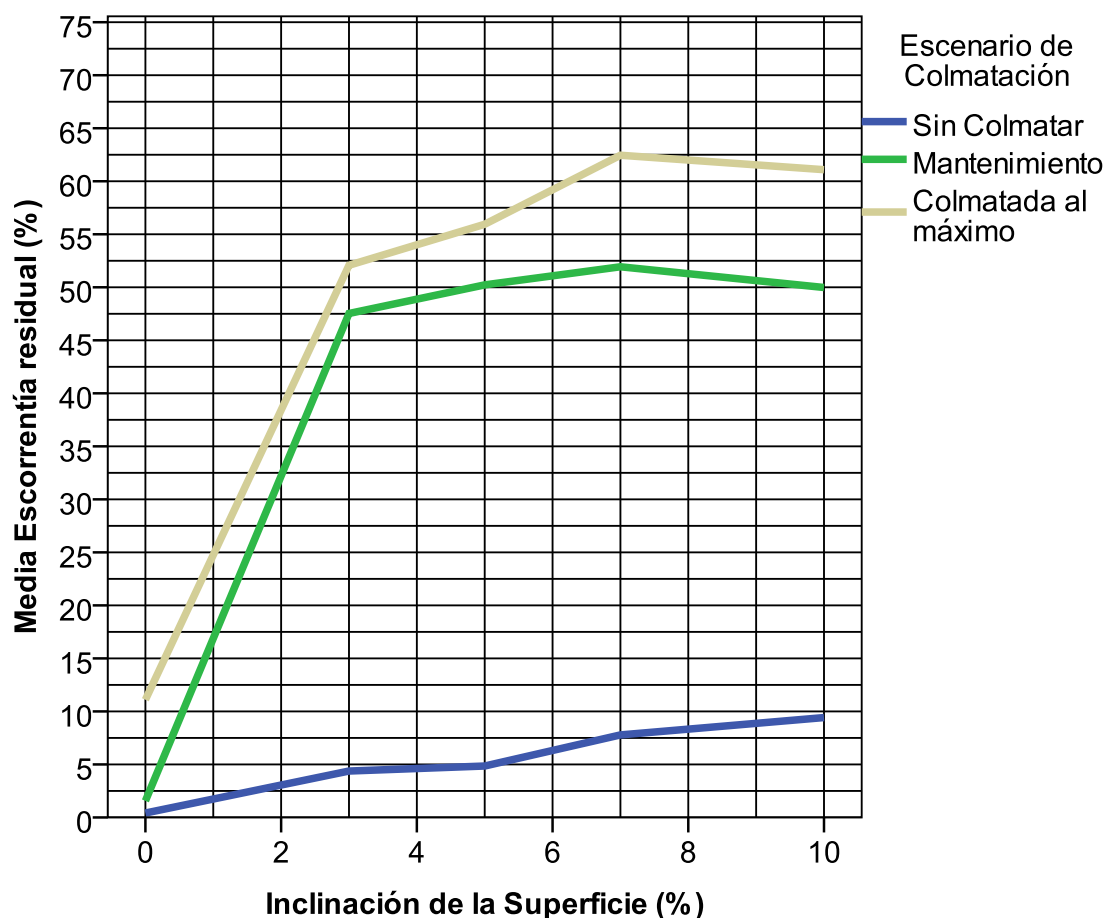


Figura 61. Tendencia de la escorrentía superficial residual en función de la pendiente de la superficie permeable para los tres escenarios de colmatación analizados para una superficie de adoquines impermeables de hormigón en disposición permeable.

A continuación se procede a la descripción de las tendencias de la reducción de la escorrentía superficial residual observadas en la Figura 60 y en la Figura 61 en función de la pendiente de la superficie para los tres escenarios de colmatación.

Comenzando por el escenario de la superficie recién construida, se observa en la Figura 61 una tendencia sensiblemente lineal de la escorrentía superficial residual en función de la pendiente de la superficie permeable. Una vez colmatada la superficie, la tendencia adquiere un comportamiento más complicado. Comienza por presentar una leve pérdida de la capacidad de infiltración en torno a un 10% para una pendiente del 0% como puede verse en la Figura 60 y en la Figura 61. Seguidamente, la pérdida de la capacidad de infiltración se eleva drásticamente hasta un valor próximo al 55% para un pequeño aumento de la pendiente de la superficie permeable hasta el 3%. A partir de esta pendiente y hasta el 7% la tendencia se vuelve sensiblemente lineal, aumentando de

forma más suave hasta alcanzar un valor ligeramente superior al 60% de pérdida de la capacidad de infiltración. Este valor representará un límite superior donde se mantendrá constante para valores de la pendiente de la superficie superiores al 7%. Tras realizar las labores de mantenimiento se observó una recuperación media en torno al 10% de la capacidad de infiltración de la superficie para todas las pendientes de la superficie (Figura 61), confirmando la recuperación identificada en la Tabla 26.

Se puede concluir por tanto que el método de adición de sedimentos utilizado en esta tesis colmató adecuadamente la superficie de adoquines con ranuras, a tenor del fuerte aumento de la escorrentía superficial residual (disminución de la capacidad de infiltración) registrado en la Figura 60 y en la Figura 61. Además, las labores de mantenimiento simuladas tuvieron una influencia pequeña pero positiva sobre la recuperación de la capacidad de infiltración.

#### 4.1.2.2 Pavimento permeable con una superficie de hormigón poroso

Una vez analizada la superficie de adoquines, se realizó el mismo tipo de análisis para las secciones de pavimento permeable ejecutadas con superficies de hormigón poroso. Se comienza por tanto con el análisis estadístico de correlación de la escorrentía superficial residual con el escenario de colmatación y con la pendiente de la superficie permeable. Los resultados obtenidos en este análisis aparecen reflejados en la Tabla 27 para un nivel de confianza del 95%.

Tabla 27. Coeficientes de correlación bivariados obtenidos mediante el análisis con la Rho de Spearman para la superficie de hormigón poroso reforzado con polímeros.

		Escenario de colmatación	Pendiente de la superficie permeable ( $S_s$ )
<b>Escorrentía residual (<math>R_R</math>)</b>	Coeficiente de correlación	0,266**	0,676**
	Significación (Bilateral)	0,077	0,000
** La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).			

Los valores de los coeficientes de correlación de la Tabla 38 ponen de manifiesto la falta de correlación entre la escorrentía superficial residual y el escenario de colmatación. Esta tendencia del comportamiento en la capacidad de infiltración puede



comprobarse en la Figura 62, donde las líneas que representan cada escenario de colmatación están muy próximas, no existiendo diferencias significativas entre ellas. Esto viene a reafirmar la conclusión obtenida previamente, referente a la falta de penetración y afección de los sedimentos sobre la superficie de hormigón poroso, de acuerdo con el método de aplicación empleado. El signo positivo del coeficiente de correlación indica además la falta de recuperación de la capacidad de infiltración tras las labores de mantenimiento realizadas sobre la probeta. Además, se puede comprobar que el mantenimiento muestra un efecto negativo al aumentar dicha penetración de los sedimentos en la superficie. Este hecho corrobora la menor afectación de este tipo de colmatación sobre este tipo de superficie porosa.

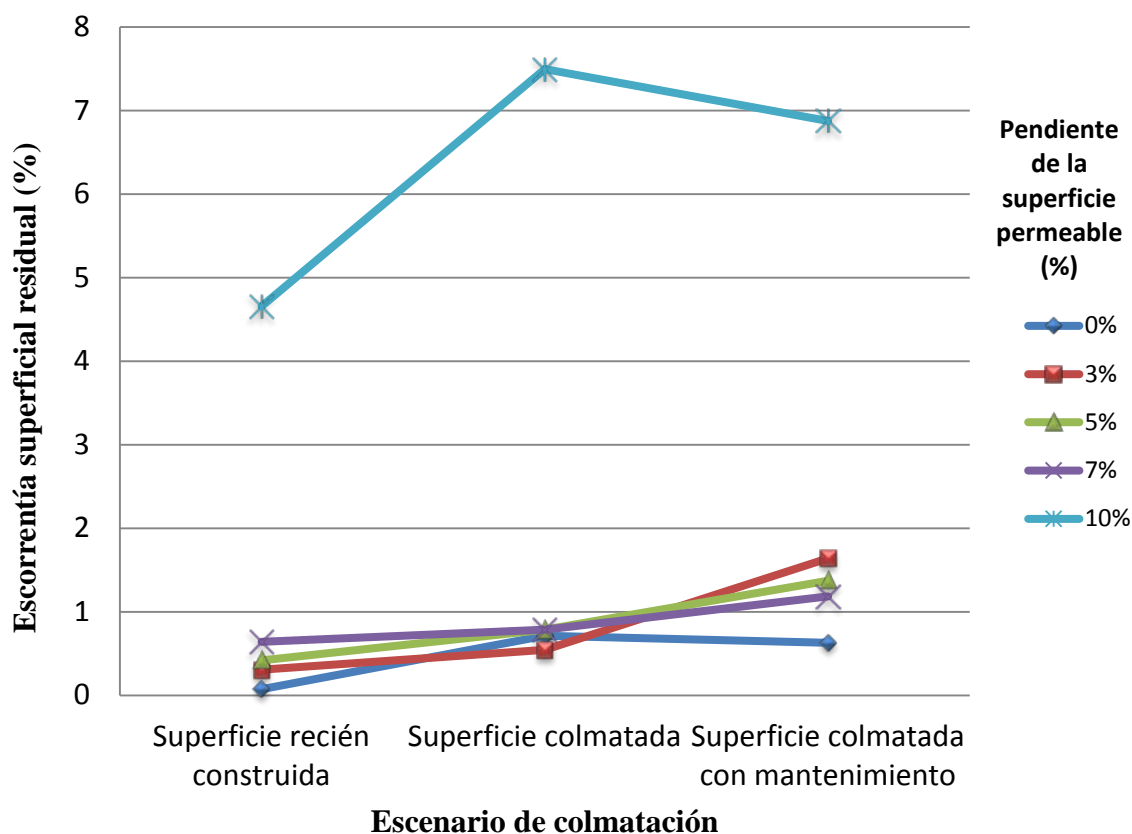


Figura 62. Valor de la escorrentía superficial residual (%) en función del escenario de colmatación y la pendiente de la superficie permeable para un pavimento permeable ejecutado mediante una superficie de hormigón poroso reforzado con polímeros.

Cabe señalar y destacar los bajos valores de la reducción de la capacidad de infiltración, siempre por debajo del 8% en todos los escenarios de colmatación (Figura 62 y Figura 63), posiblemente debido a la falta de penetración de los sedimentos en los huecos de la superficie.

Por otra parte, la correlación entre la pendiente de la superficie permeable y la escorrentía superficial residual es muy alta, como indica el valor del coeficiente de correlación en la Tabla 38. Su signo positivo indica además que a medida que aumenta la pendiente, aumenta el volumen de escorrentía superficial residual, como puede verse de forma clara en la Figura 62 y en la Figura 63.

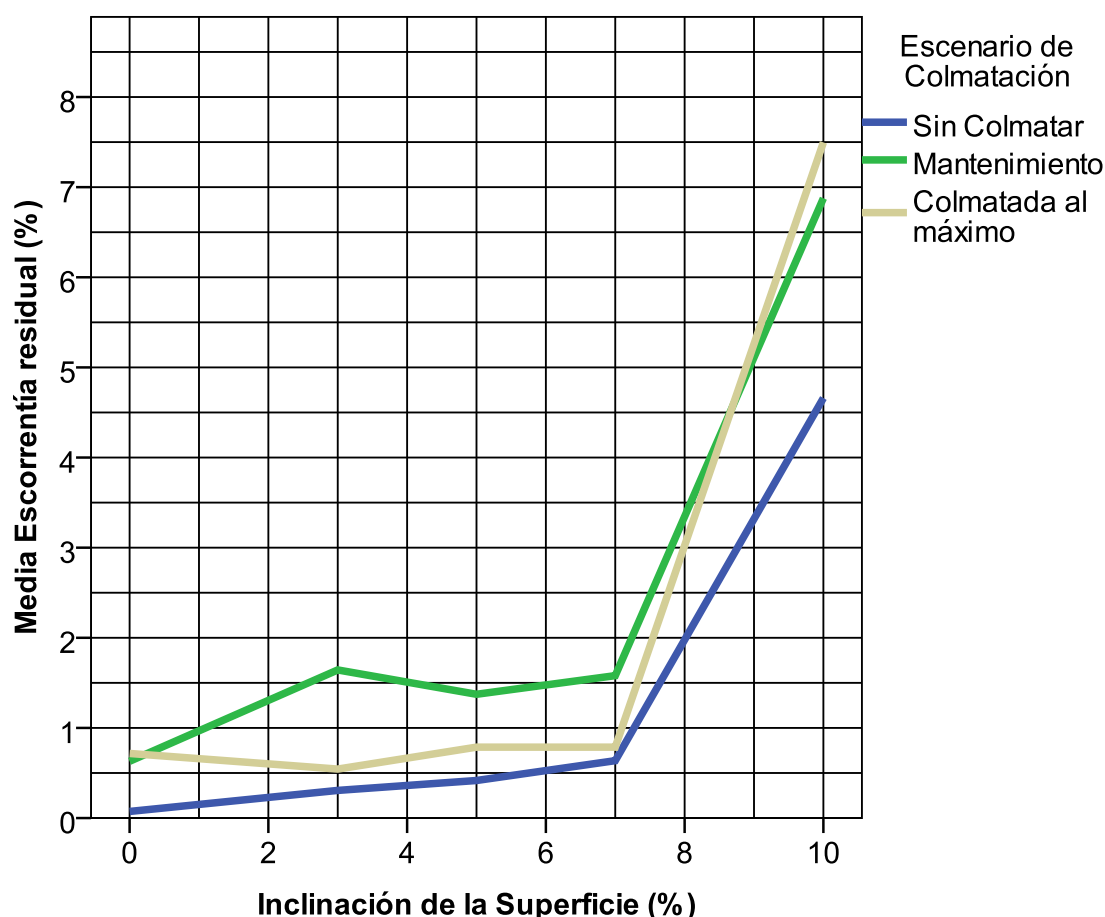


Figura 63. Tendencia de la escorrentía superficial residual en función de la pendiente de la superficie permeable para los tres escenarios de colmatación analizados para una superficie de hormigón poroso reforzado con polímeros.

Como puede apreciarse en la Figura 62 y en la Figura 63, los resultados de escorrentía superficial residual son prácticamente idénticos en todos los escenarios para pendientes de la superficie permeable iguales o menores al 7%. Esto parece indicar que la energía del flujo de la escorrentía superficial no es lo suficientemente importante como para seguir en la superficie y transformarse al final de la probeta en escorrentía superficial residual, al menos hasta pendientes iguales o inferiores al 7%. Sin embargo, al aumentar la pendiente, se produciría un aumento en la velocidad del flujo, y por ende, un

aumento en la energía de dicho flujo, con lo que se produciría un aumento en la escorrentía superficial residual.

#### 4.1.2.3 Pavimento permeable con una superficie de asfalto poroso

Por último, resta desarrollar el análisis de los resultados obtenidos para el pavimento permeable con superficie de asfalto poroso.

Tabla 28. Coeficientes de correlación bivariados obtenidos mediante el análisis con la Rho de Spearman para la superficie de asfalto poroso PA-16.

		Escenario de colmatación	Pendiente de la superficie permeable ( $S_s$ )
<b>Escorrentía residual (<math>R_R</math>)</b>	Coeficiente de correlación	0,220**	0,650**
	Significación (Bilateral)	0,146	0,000
** La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).			

Los resultados observados en la Tabla 28 muestran la falta de relación lineal entre la escorrentía superficial residual y el escenario de colmatación, reafirmando la falta de penetración de los sedimentos en los aglomerados porosos obtenida con el método de aplicación empleado en esta tesis. Por lo tanto, se puede afirmar que la simulación de la colmatación usada en esta tesis no ha afectado de manera significativa a las superficies de aglomerado poroso analizadas: hormigón poroso y asfalto poroso. Este hecho queda patente al observar en la Figura 64 los bajos valores de la reducción de la capacidad de infiltración, siempre inferiores al 17%. El signo positivo del coeficiente de correlación indicó además que el mantenimiento realizado, lejos de recuperar parte de la capacidad de infiltración perdida durante el proceso de colmatación, contribuyó a aumentar el volumen de escorrentía superficial residual, como puede verse además en la Figura 64 y en la Figura 65. La labor de mantenimiento provoca un efecto de compactación de los sedimentos conllevando una mayor penetración de los mismos en la superficie generando un aumento en la escorrentía superficial residual.

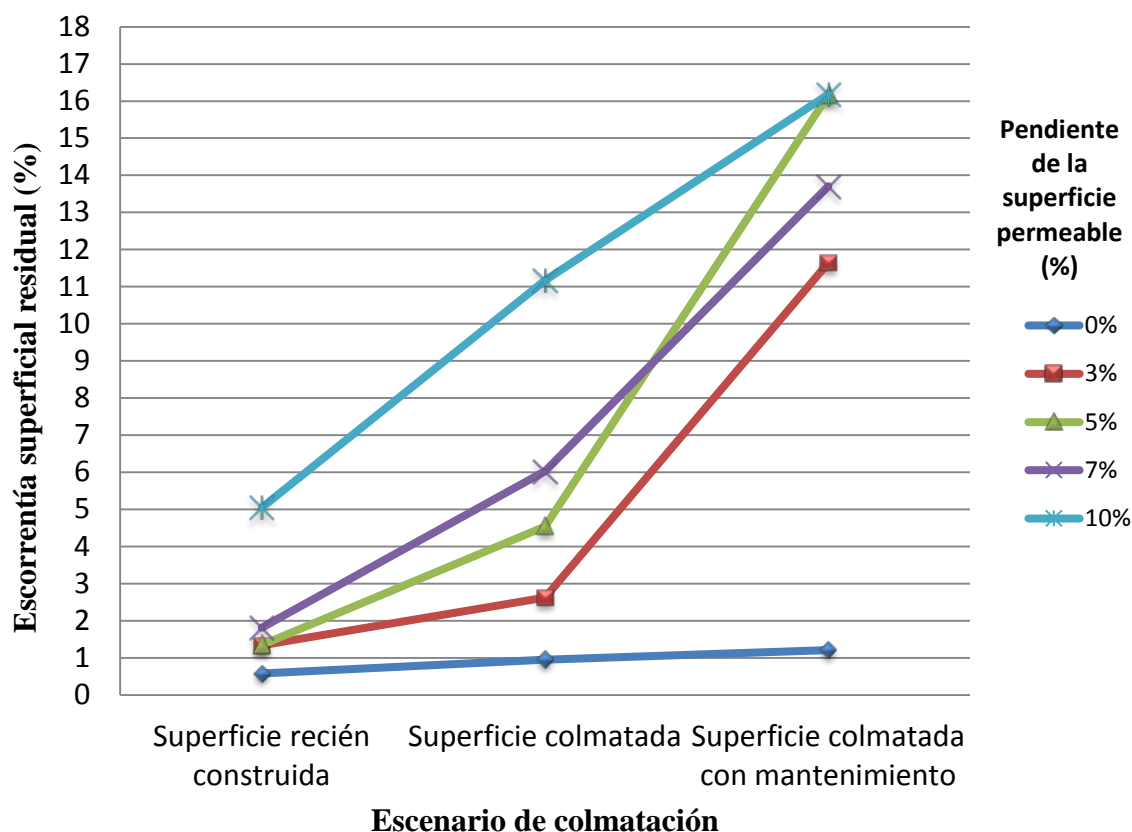


Figura 64. Valor de la escorrentía superficial residual (%) en función del escenario de colmatación y la pendiente de la superficie permeable para un pavimento permeable ejecutado mediante una superficie de asfalto poroso PA-16.

Si bien las diferencias observadas entre los valores de la escorrentía residual en función de la pendiente de la superficie en los diferentes escenarios de colmatación fueron mayores que en el caso del hormigón poroso, éstas continuaron sin ser significativas (Figura 65).

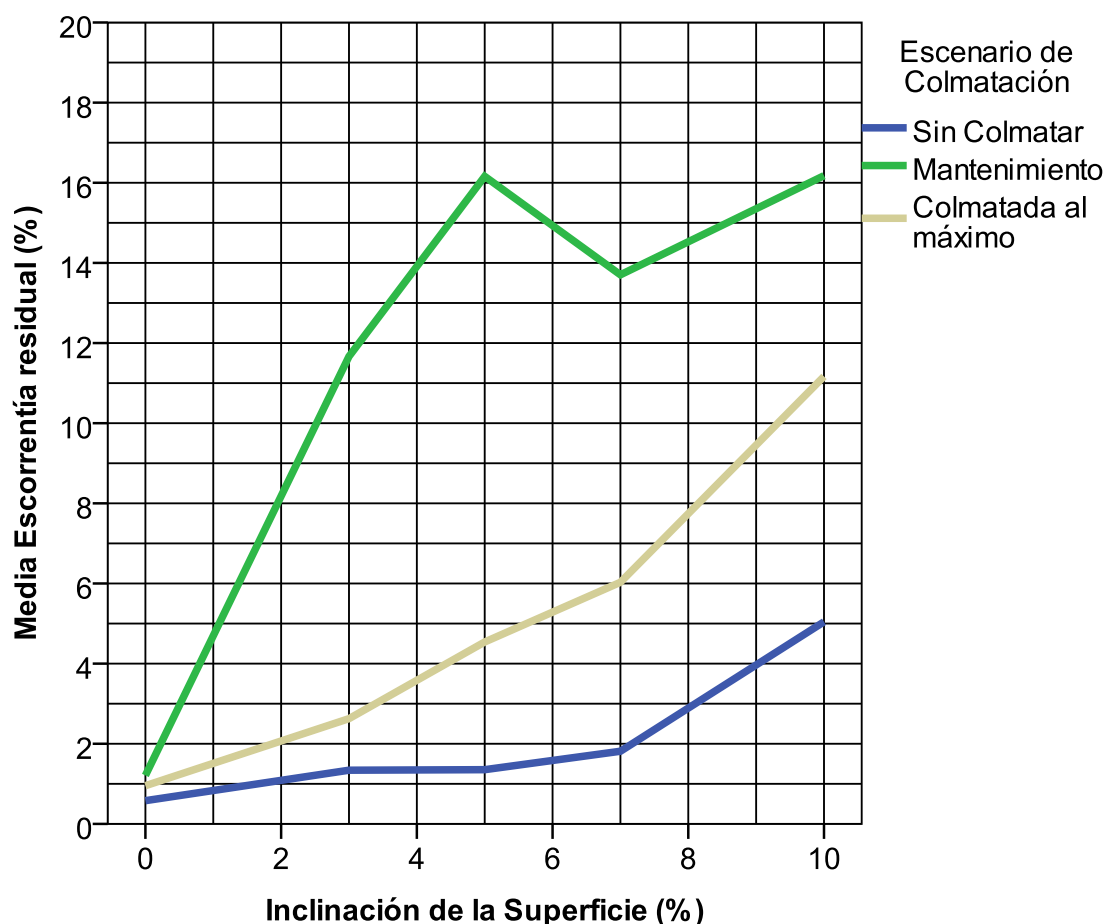


Figura 65. Tendencia de la escorrentía superficial residual en función de la pendiente de la superficie permeable para los tres escenarios de colmatación analizados para una superficie de asfalto poroso PA-16.

Como en casos anteriores, el alto valor del coeficiente de correlación registrado en la Tabla 28 entre la escorrentía superficial residual y la pendiente de la superficie indica que la relación lineal es muy alta, aumentando la escorrentía con la pendiente para cualquier estado de colmatación (Figura 64 y Figura 65).

A tenor de las similitudes encontradas en el análisis de las superficies permeables de aglomerado poroso se decidió realizar un análisis final adicional para tratar de buscar si existió relación significativa entre ambas superficies. Los valores del coeficiente de correlación obtenidos en la Tabla 29 indican que el tipo de superficie permeable tuvo una alta relación con la escorrentía superficial residual. Por lo tanto, se puede concluir que hubo diferencias significativas entre ambas superficies permeables de aglomerado poroso, si bien presentaron las similitudes ya analizadas con anterioridad.

Tabla 29. Coeficientes de correlación bivariados obtenidos mediante el análisis con la Rho de Spearman para las superficies de aglomerado poroso de hormigón poroso reforzado con polímeros y asfalto poroso.

		Tipo de superficie permeable	Escenario de colmatación	Pendiente de la superficie permeable (S <sub>s</sub> )
<b>Escorrentía residual (R<sub>R</sub>)</b>	Coeficiente de correlación	-0,481**	0,227	0,660**
	Significación (Bilateral)	0,000	0,081	0,000
** La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).				

#### 4.1.2.4 Capacidad de infiltración del geotextil en las secciones de pavimentos permeables con superficies de hormigón poroso y asfalto poroso

Como complemento a este apartado de la tesis, se llevaron a cabo los ensayos de permeabilidad al agua perpendicularmente al plano sin carga según UNE-EN ISO 11058 (2010) y el ensayo de la masa por unidad de superficie según UNE-EN ISO 9864 (2005) sobre el mismo tipo de geotextil (DANOFELT PY 150), con muestras nuevas sin utilizar y con muestras tomadas de los geotextiles utilizados en las secciones de los pavimentos permeables ensayadas en el ICF. A continuación, se muestran en la Tabla 30 los resultados obtenidos en los ensayos en función de la superficie permeable de la probeta de pavimento permeable en que fueron utilizados.

Tabla 30. Resultado de los ensayos de permeabilidad al agua perpendicularmente al plano sin carga según UNE-EN ISO 11058:2010 y ensayo de la masa por unidad de superficie según UNE-EN ISO 9864 (2005).

<b>Probeta de superficie permeable</b>	<b>Permeabilidad al agua perpendicularmente al plano sin carga según UNE-EN ISO 11058 (2010) (mm/s)</b>	<b>Masa por unidad de superficie según UNE-EN ISO 9864 (2005) (g/m<sup>2</sup>)</b>
<b>Geotextil sin colmatar</b>	155,1 ± 48,3	148
<b>Hormigón poroso 1</b>	138,8 ± 23,4	230
<b>Hormigón poroso 2</b>	159,8 ± 39,2	171
<b>Hormigón poroso 3</b>	150,3 ± 29,0	152
<b>Hormigón poroso 4</b>	158,0 ± 37,1	204
<b>Hormigón poroso 5</b>	165,2 ± 41,1	186
<b>Asfalto poroso 1</b>	160,5 ± 35,8	157
<b>Asfalto poroso 2</b>	142,5 ± 27,6	216
<b>Asfalto poroso 3</b>	163,5 ± 43,5	137

La permeabilidad que presentaron los geotextiles utilizados en los ensayos con el ICF fue de 154,4 mm/s de media en el caso de las probetas de hormigón poroso y de 155,5 mm/s en el caso del asfalto poroso, no detectándose una diferencia significativa con el valor registrado para un geotextil nuevo (155,1 mm/s).

De los datos de la masa del geotextil tras los ensayos en el ICF (Tabla 30), se desprende que una media de 38,6 g/m<sup>2</sup> y 20 g/m<sup>2</sup> de sedimentos quedaron retenidos en el geotextil situado bajo el hormigón poroso y bajo el asfalto poroso, respectivamente. Estas cantidades medias representaron un 7,72% y un 4,00% de media del total de sedimentos usados para colmatar las superficies permeables de hormigón poroso y asfalto poroso respectivamente.

Por lo tanto, se puede concluir que los sedimentos que infiltraron a través de las capas de superficie permeable y de la capa de base de árido calizo hasta llegar al geotextil no supusieron por su cantidad ningún aumento en la pérdida de permeabilidad del geotextil (Figura 66). De esta manera no afectaron en la pérdida de capacidad de infiltración del pavimento permeable, permitiendo confirmar que las superficies de aglomerado poroso no dejan pasar con facilidad los sedimentos a través de su superficie.

Además, se debe tener en cuenta que los resultados de la capacidad de infiltración en estas superficies ya mostraban unos bajos índices de colmatación superficial debido a la falta de penetración de los sedimentos aportados.



Figura 66. Detalle de los sedimentos que han infiltrado hacia el geotextil.



## 4.2 ENSAYO DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO DE UN FIRME PERMEABLE EN LABORATORIO

Tres intensidades de lluvia (100, 200 y 400 mm/h) fueron simuladas sobre tres réplicas exactas de cada uno de los tres tipos de secciones de firmes permeables estudiadas. Cabe recordar que las secciones de firme permeable estudiadas fueron la estándar, sin capa de separación y filtro entre la base y la sub-base (sin OASIS®), recibiendo el nombre de CONTROL; y dos secciones con capa de separación y filtro ejecutada mediante OASIS®, recibiendo el nombre de OASIS 1.3 (1,3 cm de espesor) y OASIS 2.0 (2,0 cm de espesor de capa) respectivamente. Por lo tanto, se llevaron a cabo un total de 27 ensayos.

### 4.2.1 ANÁLISIS DE LAS TASAS DE INFILTRACIÓN DEL FIRME PERMEABLE

En primer lugar se analizó el comportamiento en infiltración de las diferentes secciones de firme permeable en función de sus tasas de infiltración, obtenidas mediante la medida del flujo por minuto o caudal efluente a través del tubo de plástico dispuesto en la parte inferior de la probeta de ensayo. Los resultados de este ensayo pueden verse en el Anexo 2.

#### 4.2.1.1 Sección de firme permeable CONTROL

Este tipo de sección es quizá una de las más ampliamente utilizadas por las empresas especializadas en firmes permeables del Reino Unido. Durante los ensayos, esta sección se caracterizó por la aparición casi instantánea del flujo de agua por la tubería inferior (Figura 67). Este resultado tiene una primera implicación, que es la baja retención o laminación de la sección de firme ante un evento de lluvia extremo con intensidades iguales o superiores a 100 mm/h. Como referencia de este fenómeno, una gota de agua tardó una media de 23 segundos en atravesar toda la sección del firme permeable, independientemente de la intensidad de lluvia extrema simulada.

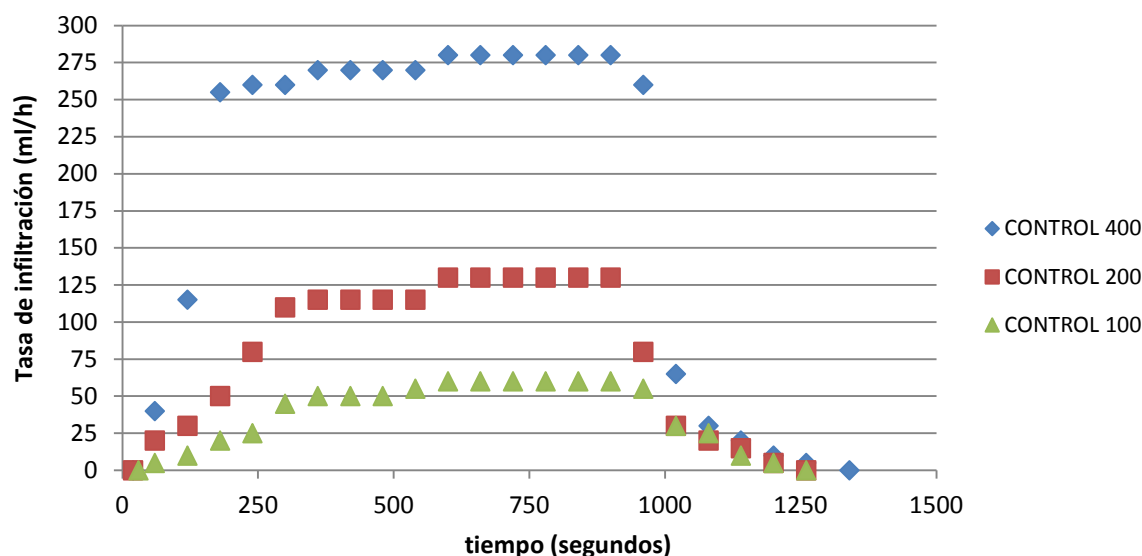


Figura 67. Hidrograma de descarga de la sección CONTROL representado mediante las tasas de infiltración para intensidades de lluvia de 100, 200 y 400 mm/h.

El efluente alcanzó un valor próximo al caudal punta (93%) al cabo de 3 o 4 minutos de haberse iniciado la lluvia simulada. En el caso de una intensidad de lluvia de 400 mm/h, el caudal punta de 280 ml/min se alcanzó al cabo de 10 minutos de haberse iniciado la aportación de agua (Figura 67). Para el caso de una intensidad de 200 mm/h, alcanzó valores próximos al 85% del caudal punta después de 5 minutos de haber comenzado la aportación de agua, alcanzando el caudal punta a los 10 minutos (Figura 67). Finalmente, para el caso de 100 mm/h de intensidad de lluvia simulada, se alcanza un valor cercano al 85% entre los 5 y 6 minutos de haber comenzado la aportación de agua, siendo 10 minutos la duración necesaria del evento de lluvia para alcanzar el caudal punta (Figura 67).

Una vez se produce el cese de la aportación de agua a los 15 minutos después de haber comenzado la misma, la sección de firme permeable CONTROL reacciona de forma instantánea, reduciéndose de forma drástica el caudal efluente hasta valores próximos a 0 ml/min después de unos 6 o 7 minutos de haber finalizado la lluvia, en todos los casos (Figura 67).

En cuanto a la forma de la curva del volumen efluente acumulado, presenta la disposición mostrada en la Figura 68, dependiendo de la intensidad de lluvia simulada.

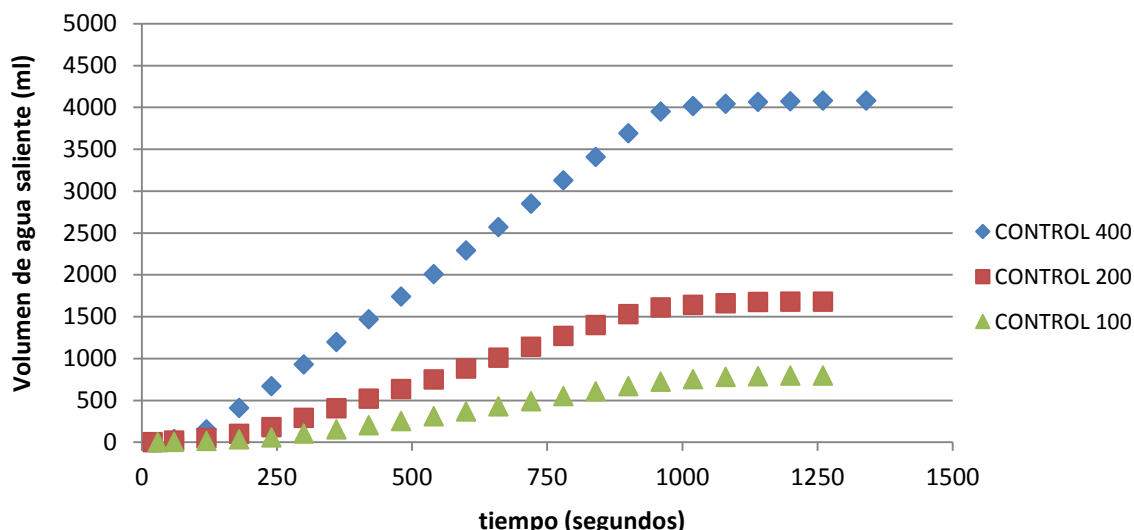


Figura 68. Volumen medio de agua saliente por el tubo de plástico inferior en las secciones de firme permeable CONTROL.

La tendencia de las curvas es lineal casi desde los primeros compases del ensayo hasta el momento en que cesa la aportación de agua de lluvia. A partir de ese momento, dado el cese de la aportación de lluvia y el drástico descenso en el volumen efluente a tenor de la reacción instantánea del sistema, la tendencia pasa a ser prácticamente horizontal (Figura 68).

#### 4.2.1.2 Sección de firme permeable OASIS 1.3

En el caso de las secciones de firme con OASIS®, la aportación de agua se mantuvo hasta que el sistema alcanzó el caudal punta. Por lo tanto, y a efectos comparativos con los resultados obtenidos en las secciones de firme permeable CONTROL, se hablaría de número de eventos de lluvia consecutivos de 15 minutos de duración necesarios para alcanzar el caudal punta en función del espesor de OASIS® y de la intensidad de lluvia simulada.

Como puede apreciarse en la Figura 69, el caudal efluente de la sección OASIS 1.3 comenzó como término medio a los 3,0 minutos después de iniciada la aportación de agua en el caso de intensidades de lluvia de 400 mm/h. En el caso de intensidades de 200 mm/h, el tiempo medio que necesitó una gota para cruzar todas las capas de la sección de firme permeable fue de 7,7 minutos (Figura 69). Finalmente, para el caso de intensidades de 100 mm/h, el tiempo medio para el comienzo del caudal saliente fue de 13,8 minutos (Figura 69).

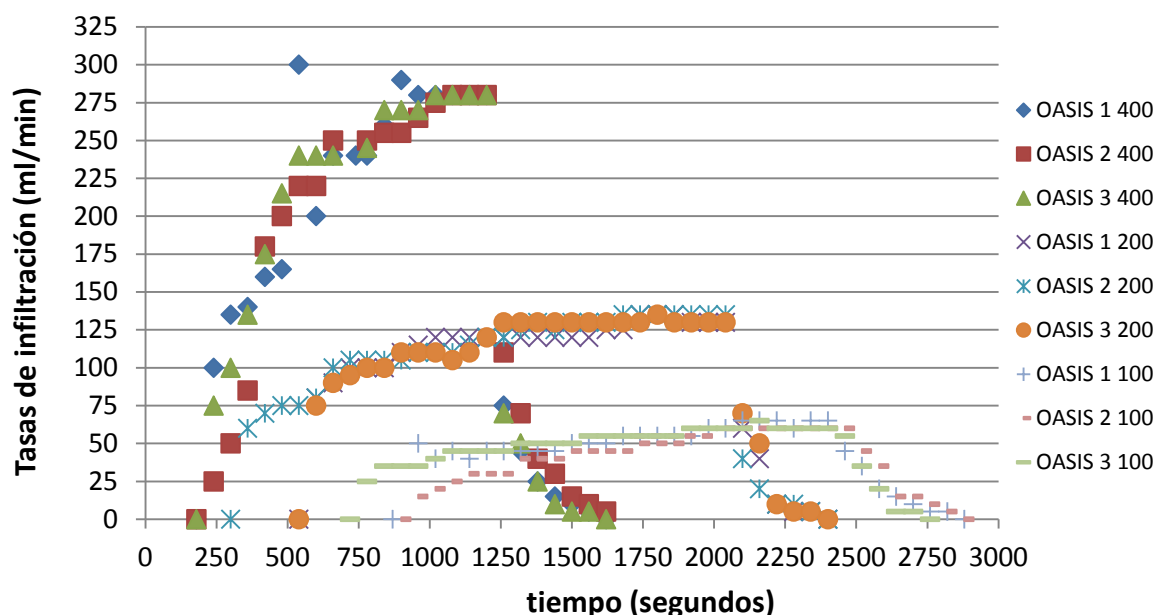


Figura 69. Hidrograma de descarga de la sección OASIS 1.3 representado mediante las tasas de infiltración para intensidades de lluvia de 100, 200 y 400 mm/h.

El desplazamiento del hidrograma que representa la curva de descarga del firme permeable es evidente si se compara el comportamiento de la sección CONTROL (Figura 67) con la sección OASIS 1.3 (Figura 69) al comienzo del mismo. También se produce un claro desplazamiento de la curva de descarga en cuanto al tiempo que necesitó la sección de firme permeable OASIS 1.3 para alcanzar el caudal punta asociado a cada intensidad. En el caso de la intensidad de lluvia de 400 mm/h, el sistema necesitó una media de 16,7 minutos desde el comienzo de la aportación de agua, tardando 13,7 minutos en alcanzar el estado estacionario de infiltración tras el comienzo del flujo efluente. Este tiempo de 16,7 minutos representa un retardo de 6,7 minutos con respecto a la sección CONTROL. Además, ese tiempo total para alcanzar el caudal punta debido a la intensidad de lluvia simulada excedió los 15 minutos de duración del evento de lluvia seleccionado para simular, haciendo necesaria la simulación de 1,67 minutos extra hasta poder alcanzar dicho punto.

Para el caso de una intensidad de 200 mm/h, el sistema necesitó una media de 25,0 minutos desde el comienzo del ensayo, siendo 17,3 minutos de media desde la aparición del caudal saliente (Figura 69). Estos 25 minutos representan un retardo de 15 minutos con respecto a la sección CONTROL para alcanzar el caudal punta. Estos 15

minutos ganados equivalen a un evento completo de lluvia con una intensidad de 200 mm/h, siendo por tanto la capacidad atenuadora del sistema más que significativa. Teniendo en cuenta los 25 minutos en total que necesitó de media el sistema para alcanzar el estado estacionario de infiltración, se puede afirmar que correspondió prácticamente a la simulación de dos eventos de lluvia de 200 mm/h de 15 minutos de duración de forma consecutiva, lo que da de nuevo una clara idea del poder atenuador de una delgada capa de OASIS® de 1,3 cm de espesor.

Finalmente, para el caso de una intensidad de 100 mm/h, el sistema necesitó de una media total de 33,0 minutos para alcanzar el caudal punta, excediendo claramente la simulación de dos eventos consecutivos de 15 minutos. El tiempo que necesitó, sin embargo, para alcanzar dicho caudal punta desde la aparición del caudal saliente fue en término medio de 19,2 minutos, excediendo nuevamente la duración de 15 minutos de un evento de lluvia individual.

#### **4.2.1.3 Sección de firme permeable OASIS 2.0**

En el caso de la sección de firme OASIS 2.0 (2,0 cm de espesor de capa), el caudal efluente por el tubo de plástico inferior dio comienzo a los 5,7 minutos como valor medio entre las 3 probetas analizadas para una lluvia de intensidad 400 mm/h (Figura 70). Para el caso de intensidades de 200 mm/h, el valor medio del tiempo que necesitó una gota para cruzar toda la sección y comenzar a salir por el tubo de plástico fue de 11,3 minutos (Figura 70). Finalmente, y para el caso de menor intensidad ensayada (100 mm/h), el tiempo medio de concentración fue de 19,9 minutos (Figura 70). Este dato supone que esta sección de firme permeable con 2,0 cm de espesor de OASIS® en su interior es capaz de absorber al menos un evento completo de lluvia de 100 mm/h de intensidad y una duración de 15 minutos.

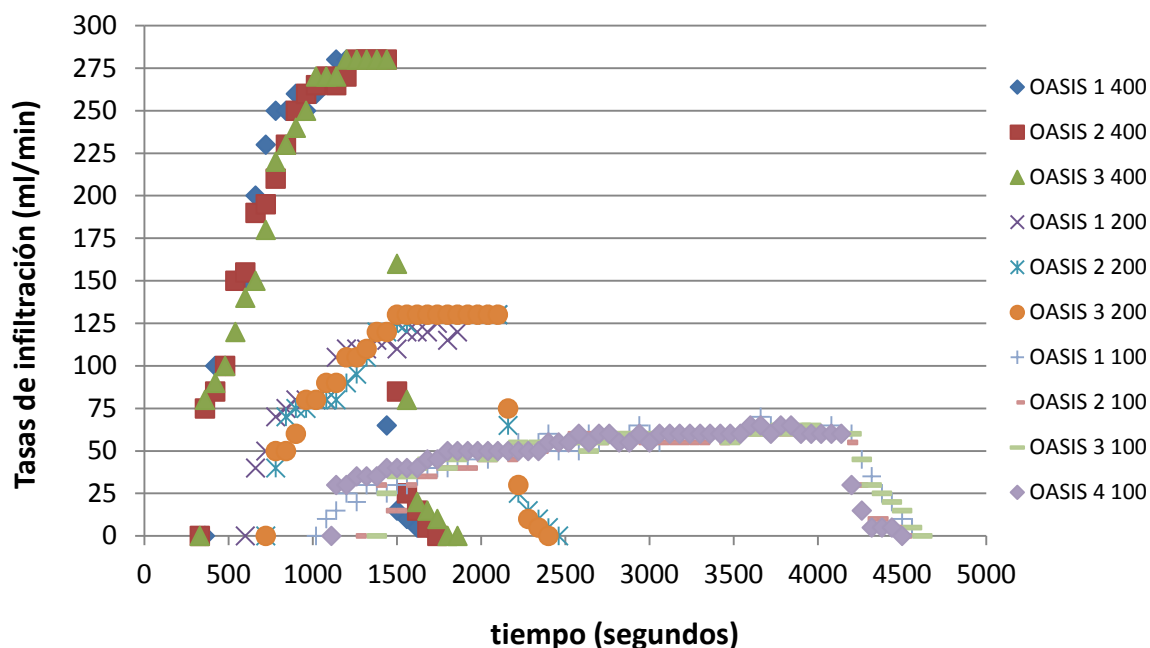


Figura 70. Hidrograma de descarga de la sección OASIS 2.0 representado mediante las tasas de infiltración para intensidades de lluvia de 100, 200 y 400 mm/h.

Se continua observando un claro desplazamiento en el hidrograma representativo de la curva de descarga del firme permeable a través de las tasas de infiltración comparando la Figura 67, la Figura 69 y la Figura 70, correspondientes a la sección CONTROL, OASIS 1.3 y OASIS 2.0, respectivamente. El mismo comportamiento en cuanto al desplazamiento de la curva del hidrograma fue observado para el tiempo que necesitó el sistema para alcanzar el caudal punta debido a cada intensidad de lluvia. Para una intensidad de lluvia de 400 mm/h, la sección de firme permeable OASIS 2,0 necesitó una media de 20 minutos (Figura 70) medidos desde el comienzo del ensayo para alcanzar el caudal punta. Este tiempo supone que necesitó más de un evento de lluvia de 15 minutos con dicha intensidad de lluvia para alcanzar el estado de infiltración estacionario. Sin embargo, el tiempo medido desde el comienzo de la infiltración fue de 14,3 minutos (Figura 70), equivalente prácticamente al tiempo de duración de un evento de lluvia simulado. Esta última medida es casi idéntica al caso de la sección de 1,3 cm de espesor de OASIS®. Estos 20 minutos necesarios para alcanzar el régimen estacionario de infiltración supone un retardo de 10,0 minutos en comparación con la sección de CONTROL y de 3,3 minutos con respecto a la sección de OASIS 1.3.

En el caso de una intensidad de 200 mm/h, el sistema necesitó de una media de 28 minutos (Figura 70), medidos desde el comienzo del ensayo, para alcanzar el caudal

punta que marca el comienzo del estado estacionario de infiltración. Este tiempo es prácticamente equivalente a dos eventos de lluvia consecutivos de 200 mm/h de intensidad y 15 minutos de duración. Tomando la referencia del inicio del caudal efluente, el valor medio medido fue de 16,7 minutos (Figura 70), siendo prácticamente el mismo tiempo que necesitó la sección de firme permeable OASIS 1.3 en el mismo intervalo. Por tanto, una vez saturado, el espesor de la capa de OASIS no influye en la tasa de infiltración. Este tiempo, a su vez, superó la duración de un evento de lluvia de 15 minutos para dicha intensidad ensayada.

Por último, para el caso de una intensidad de lluvia de 100 mm/h, el sistema OASIS 2.0 necesitó una media de 42,7 minutos (Figura 70) para alcanzar el caudal punta, lo que equivaldría a casi 3 eventos consecutivos de lluvia de 15 minutos de duración con dicha intensidad. Este tiempo es 32,7 minutos mayor que el tiempo que necesitó la sección de CONTROL para alcanzar el estado estacionario, equivaliendo a más de dos eventos consecutivos de lluvia con dicha intensidad de diferencia. No obstante, el tiempo medido desde el comienzo de la aparición del caudal efluente fue de 22,8 minutos (Figura 70). Esta última medición fue superior a la registrada con la sección OASIS 1.3 para la misma intensidad de lluvia en casi 10 minutos, lo que induce a pensar que con mayores espesores, se incrementa el tiempo de laminación del caudal punta desde que el comienzo de la aparición del caudal saliente. Es decir, la laminación es mayor para intensidades de lluvia menores y mayores espesores de la capa OASIS®. Más adelante se analizará más en profundidad la influencia de los espesores en función de las intensidades estudiadas, lo que dará lugar a una mayor comprensión del comportamiento del material.

#### **4.2.2 FASES DE FUNCIONAMIENTO DEL OASIS®**

Para un análisis más completo del funcionamiento de las secciones de firmes permeables estudiadas se hace necesario el estudio de las diferentes fases de funcionamiento de cada una de ellas. Dichos periodos habían quedado definidos en la metodología como fase inicial, dividida a su vez en sub-fase de concentración o tiempo de concentración (tiempo que tarda una gota de agua de lluvia en infiltrar a través de la sección completa del firme permeable) y sub-fase intermedia (tiempo que tarda en alcanzar el caudal punta considerado como una tasa de infiltración constante a través de la sección de firme permeable desde el comienzo de la aparición del flujo de agua), fase estacionaria (caudal de infiltración estacionario hasta el final del evento de lluvia), y fase

de descarga (medida desde el final del evento de lluvia).

El comienzo de la aparición de caudal efluente a través del tubo de plástico situado en la parte inferior de cada probeta fue el reflejado en la Figura 71. Como ya se puso de manifiesto anteriormente, las probetas de sección CONTROL necesitaron una media de 0,5 minutos para la aparición de caudal saliente, lo cual se puede considerar una reacción prácticamente instantánea al evento de lluvia que se estaba simulando. No obstante, si se considera 0,5 minutos dentro de un evento de lluvia con intensidades extremas superiores a 100 mm/h, este tiempo supone la atenuación de un volumen importante de agua (0,83 L/m<sup>2</sup> en el caso de 100 mm/h, 1,67 L/m<sup>2</sup> en el caso de 200 mm/h, y 3,33 L/m<sup>2</sup> en el caso de 400 mm/h). Por ejemplo, si trasladamos este tiempo de atenuación mediante la fórmula del método racional al aparcamiento experimental de “Las Llamas” en Santander, el cual ha sido analizado en esta tesis, el volumen de agua atenuado sería de 1512 litros (3,33 L/m<sup>2</sup>) para una intensidad de 400 mm/h, 756 litros (1,67 L/m<sup>2</sup>) para una intensidad de 200 mm/h, y 378 litros (0,83 L/m<sup>2</sup>) para una intensidad de 100 mm/h. Todo ello considerando únicamente las 45 plazas de firme permeable con una superficie de 4,2 x 2,4 m<sup>2</sup>, resultando una superficie permeable total de 453,6 m<sup>2</sup> ejecutada hipotéticamente mediante la sección CONTROL. Esto invita con claridad a no despreciar esta atenuación, aunque sobre el papel represente un valor temporal aparentemente bajo.



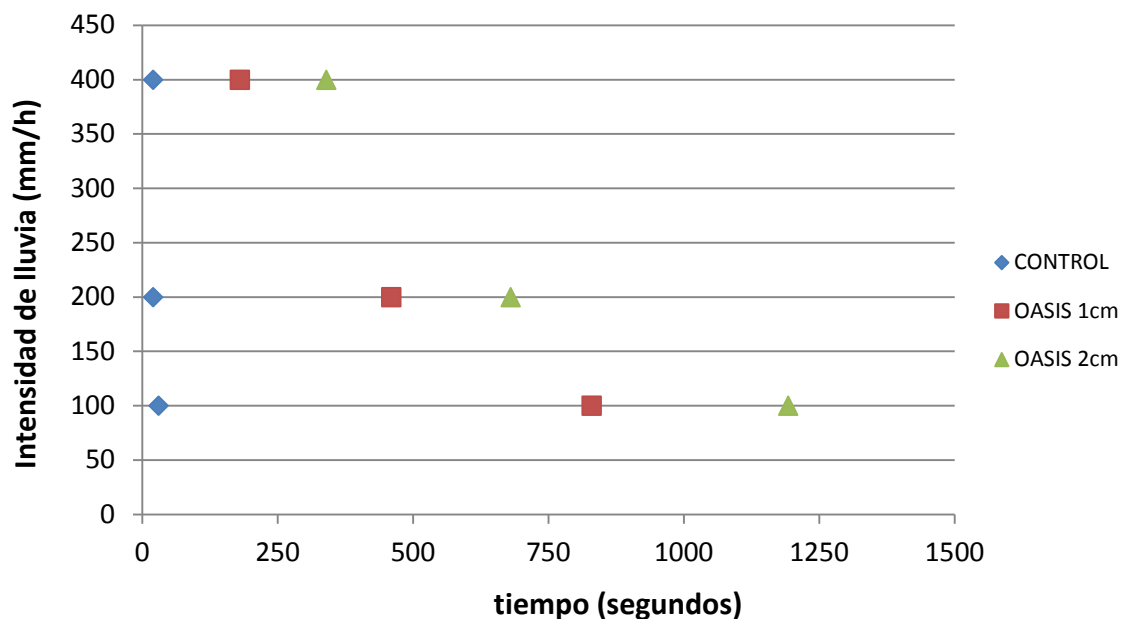


Figura 71. Tiempo medio que necesitó cada sección de firme permeable para la aparición del caudal efluente con las intensidades de lluvia ensayadas en este estudio.

En el caso de las secciones permeables ejecutadas introduciendo la capa de OASIS®, la atenuación es muy superior, como ya pudo comprobarse en los hidrogramas de descarga mostrados con anterioridad (Figura 67, Figura 69 y Figura 70). Para una mayor claridad en la interpretación de los resultados se resumen dichos valores en la Tabla 28, con el objetivo de analizar los volúmenes teóricos de atenuación que dichos diseños de sección con OASIS® podrían aportar por metro cuadrado de superficie permeable.

Tabla 31. Valores del tiempo medido desde el comienzo del ensayo para la aparición del caudal saliente, y valores del volumen de agua atenuado para el caso hipotético de un aparcamiento permeable.

SECCIÓN DE FIRME PERMEABLE	INTENSIDAD DE LLUVIA (mm/h)	TIEMPO (minutos)	VOLUMEN DE ATENUACIÓN (l/m <sup>2</sup> )
<b>CONTROL</b>	100	0,5	0,83
	200	0,5	1,67
	400	0,5	3,33
<b>OASIS 1.3</b>	100	13,8	23
	200	7,7	26
	400	3,0	20
<b>OASIS 2.0</b>	100	19,9	33
	200	11,3	38
	400	5,7	38

Los volúmenes de atenuación observados en la Tabla 31 muestran una diferencia muy importante entre las secciones de OASIS® y las de CONTROL analizadas previamente, siendo muy relevante al mismo tiempo la diferencia que se advierte entre la utilización de una capa de OASIS® de 1,3 cm y una capa de OASIS® de 2,0 cm. De la misma forma se observó que el ratio del espesor ( $2,0 / 1,3 = 1,54$ ) se mantuvo aproximadamente entre los valores de atenuación de ambas capas, manteniéndose una relación entre la atenuación y el espesor de la capa.

Como parte de la comprensión del funcionamiento de las distintas secciones de firme permeable estudiadas se utilizó la Figura 72, la cual muestra el tiempo necesario desde la aparición del caudal efluente hasta alcanzar el caudal punta o estado estacionario que da comienzo a la segunda fase de funcionamiento del firme permeable (sub-fase intermedia dentro de la fase inicial).

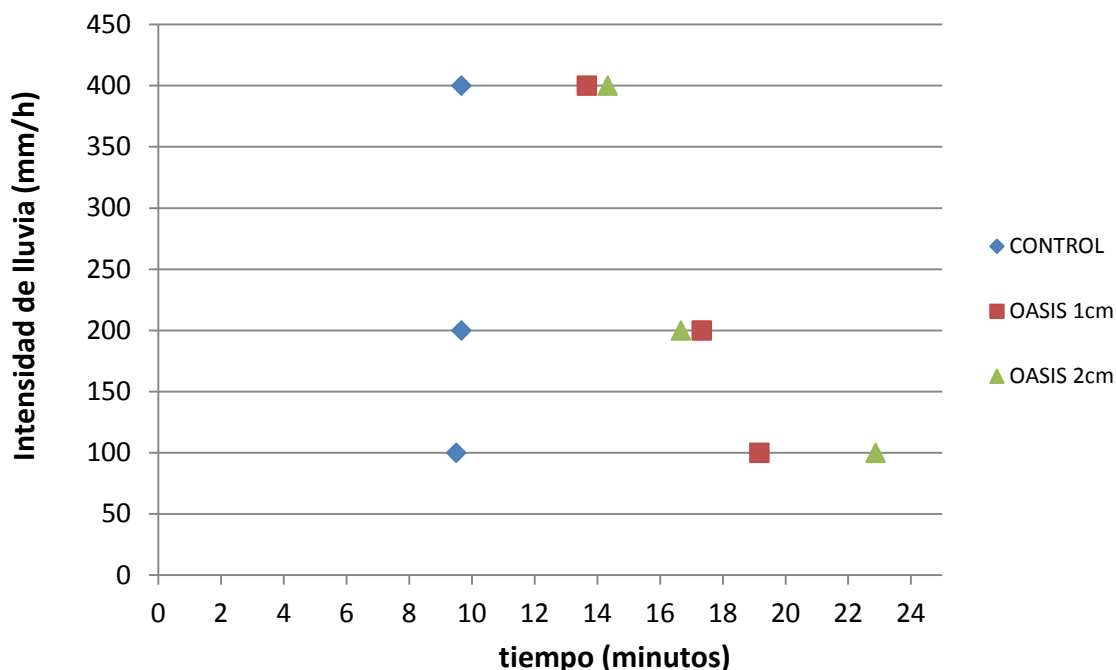


Figura 72. Tiempo necesario para alcanzar el caudal punta debido a cada intensidad de lluvia en función de la sección de firme permeable desde el comienzo de la aparición del caudal saliente.

La primera reflexión que se extrae de esta gráfica es la comprobación del valor de 10 minutos sugerido por Davies et al. (2002) y Rodríguez Hernández (2008) y utilizado posteriormente por Sañudo-Fontaneda et al. (2013 a, b) para alcanzar el estado estacionario de infiltración en firmes permeables ensayados en laboratorio. Sumando los valores de la Figura 71 y la Figura 72 se obtienen los 10 minutos sugeridos previamente por dichos autores. De esta forma, podría afirmarse que se trata de uno de los primeros estudios que demuestran este punto, al menos para el caso de lluvias extremas superiores a 100 mm/h, como lo ha puesto de manifiesto Nnadi et al. (2014), en la publicación basada en esta parte de la tesis.

En la Figura 69 y en la Figura 70 se observa la atenuación extra que aporta el OASIS® en esta sub-fase intermedia (segunda sub-fase dentro de la fase inicial), superando en todos los casos los 14 minutos, pudiendo llegar en algunos casos a los 23 minutos. Por lo tanto, en el caso más desfavorable de mayor intensidad (400 mm/h), la atenuación llegaría en torno a la duración de un evento de lluvia de 15 minutos (evento estándar analizado en esta investigación), no alcanzándose el caudal punta dentro de dicho evento en la mayoría de los casos, o muy hacia el final en el caso más desfavorable. Si se tiene en cuenta el tiempo total, desde el comienzo del ensayo, que necesitan las secciones de OASIS® para alcanzar el caudal punta y los volúmenes totales respectivos en

función de cada intensidad de lluvia ensayada, los valores serían los mostrados en la Tabla 35.

Tabla 32. Valores del tiempo medido desde el comienzo del ensayo para alcanzar el caudal punta o fase estacionaria, y valores del volumen de agua correspondiente para el caso hipotético de un aparcamiento permeable.

SECCIÓN DE FIRME PERMEABLE	INTENSIDAD DE LLUVIA (mm/h)	TIEMPO (minutos)	VOLUMEN (L)
<b>CONTROL</b>	100	10,0	7560 (17 L/m <sup>2</sup> )
	200	10,0	7560 (17 L/m <sup>2</sup> )
	400	10,0	7560 (17 L/m <sup>2</sup> )
<b>OASIS 1.3</b>	100	33,00	24948 (55 L/m <sup>2</sup> )
	200	25,00	37800 (83 L/m <sup>2</sup> )
	400	16,67	50410 (111 L/m <sup>2</sup> )
<b>OASIS 2.0</b>	100	42,75	32319 (71 L/m <sup>2</sup> )
	200	28,00	42336 (93 L/m <sup>2</sup> )
	400	20,00	60480 (133 L/m <sup>2</sup> )

Dichos volúmenes son los necesarios para alcanzar el caudal punta en el 100% del aparcamiento permeable en los casos hipotéticos de ejecución de las plazas mediante las secciones OASIS 1.3 y OASIS 2.0. Partiendo de un análisis comparativo en función del número de eventos consecutivos de lluvia, de 15 minutos de duración para cada intensidad, que necesita el sistema para alcanzar el caudal punta, se aprecia que en ningún caso es inferior a un evento completo. Este resultado permite afirmar que se rebasarían sobradamente periodos de retorno de 100 años en las ciudades del mundo que presentan unos mayores valores de intensidad de lluvia según la Figura 12, incluso en los casos más desfavorables de menor espesor de la capa de OASIS® (1,3 cm) y mayor intensidad de lluvia (400 mm/h). En el resto de casos, los periodos de retorno estarían entre 100 y 1000 años para las ciudades estudiadas.

Una vez analizado en profundidad cada caso, el resumen del esquema de funcionamiento de las diferentes secciones de firme permeable con capa de OASIS® sería el mostrado en la Figura 73. En dicha figura se observan los límites entre las distintas zonas de funcionamiento:

- **ZONA A. Absorción.** Zona correspondiente con la fase inicial descrita en la

metodología de los ensayos. En esta zona el OASIS® absorbe todo el agua de lluvia que llega hasta él, no dejando que la misma infiltre hacia la capa de sub-base. Por lo tanto, se podría hablar perfectamente no solo de volumen atenuado, sino también de volumen almacenado.

- **ZONA B. Absorción e infiltración.** Esta zona corresponde con la segunda etapa de la fase inicial medida desde el comienzo de la aparición del caudal saliente hasta el límite con la fase estacionaria (sub-fase intermedia), descritas ambas en la metodología de los ensayos. En esta zona el OASIS® no está completamente saturado, sino que algunos puntos o zonas localizadas de su superficies se encuentran saturadas. Esto da inicio a la infiltración del agua de lluvia hacia la capa de sub-base del firme permeable. No obstante, el OASIS® aún continúa absorbiendo y almacenando agua de lluvia, lo que lleva a un aumento en la atenuación durante esta segunda zona de funcionamiento.
- **ZONA C. Infiltración.** Esta zona corresponde a la fase de descarga descrita en la metodología de los ensayos. En esta etapa el OASIS® se encuentra completamente saturado y funciona como una sección de firme permeable estándar (CONTROL), infiltrando todo el agua de lluvia a través de todas sus capas. El límite entre la zona B y C podría considerarse como el final de la atenuación extra aportada por el OASIS® a una sección estándar de firme permeable (CONTROL).

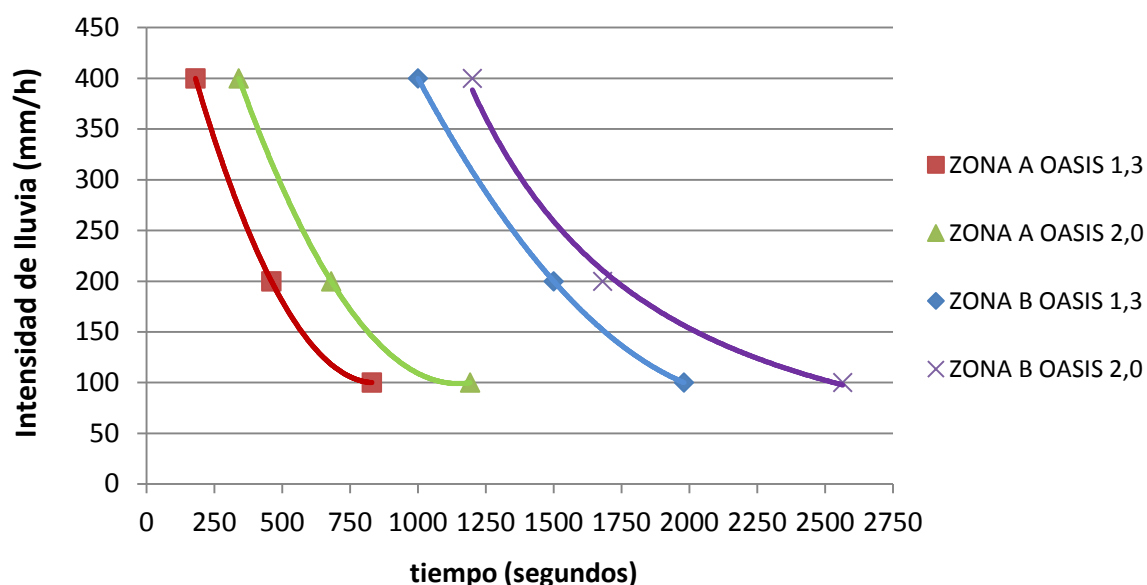


Figura 73. Esquema de las zonas de funcionamiento de las secciones de firme permeable con capas de OASIS®.

Por lo tanto, 4 fases de ensayos dan lugar a 3 zonas fundamentales de funcionamiento del OASIS® en el interior de las secciones de firmes permeables.

#### 4.2.3 ANÁLISIS DEL VOLUMEN ALMACENADO EN EL FIRME PERMEABLE

A raíz de los resultados anteriores, el interés se centra en los volúmenes de agua que cada capa de OASIS® es capaz de almacenar en cada una de las fases hasta su saturación: zonas de funcionamiento A y B.

Así, como comienzo del análisis se muestran los volúmenes almacenados en el OASIS® durante su zona de absorción (zona A) en la Tabla 33.

Tabla 33. Volumen medio de agua almacenado dentro de cada capa de OASIS® en la zona A de funcionamiento en función de la intensidad de lluvia en los ensayos de laboratorio.

SECCIÓN DE FIRME PERMEABLE	INTENSIDAD DE LLUVIA (mm/h)	TIEMPO COMIENZO CAUDAL EFLUENTE (minutos)	VOLUMEN ALMACENADO (L)
<b>OASIS 1.3</b>	400	3,0	<b>0,900</b>
	200	7,7	<b>1,150</b>
	100	13,8	<b>1,038</b>
<b>OASIS 2.0</b>	400	5,7	<b>1,700</b>
	200	11,3	<b>1,700</b>
	100	19,9	<b>1,491</b>

Los valores de la Tabla 33 muestran unos volúmenes muy similares que permiten afirmar, al menos desde un punto de vista descriptivo, y con toda la cautela posible que, para un determinado espesor, el volumen de almacenamiento del OASIS® es independiente de las intensidades de lluvia simuladas. En el caso de la capa de 1,3 cm de espesor, los valores medios de almacenamiento durante la zona A fueron de 1,0 litro, mientras que en el caso de 2,0 cm de espesor, el valor medio de almacenamiento fue de 1,6 litros. El ratio entre estos resultados se aproxima al ratio en la relación entre los espesores (1,54), lo que muestra que podría existir una relación lineal entre el aumento del espesor de la capa de OASIS® y el volumen de agua almacenada por él.

En la Tabla 34 se muestran los volúmenes totales registrados en las zonas A y B, que corresponden a los volúmenes totales almacenados por las capas de OASIS®. El agua utilizada en cada ensayo para simular eventos de lluvia consecutivos de 15 minutos de duración para cada intensidad de lluvia, fue función del tiempo necesario para alcanzar el caudal punta o fase estacionaria de infiltración. De ahí las diferencias registradas en este parámetro recogido en la Tabla 34. La columna de agua infiltrada hace referencia al volumen de agua infiltrada en el total del ensayo, teniendo en cuenta aquella agua que continuó infiltrando durante las 24 horas siguientes al ensayo.

Tabla 34. Volumen medio de agua almacenado en total (zonas A y B) dentro de cada capa de OASIS® en función de la intensidad de lluvia en los ensayos de laboratorio.

SECCIÓN DE FIRME PERMEABLE	INTENSIDAD DE LLUVIA (mm/h)	AGUA UTILIZADA EN LOS ENSAYOS (L)	AGUA INFILTRADA (L)	VOLUMEN ALMACENADO (L)
<b>OASIS 1.3</b>	400	6,000	4,493	<b>1,507</b>
	200	5,100	3,603	<b>1,497</b>
	100	3,025	1,697	<b>1,328</b>
<b>OASIS 2.0</b>	400	7,100	4,783	<b>2,317</b>
	200	5,250	2,967	<b>2,283</b>
	100	5,206	3,010	<b>2,196</b>

Los volúmenes registrados en función del espesor de la capa se mantienen muy próximos para cualquiera de las intensidades simuladas, por lo que podría afirmarse de forma cautelara que, para el mismo espesor, el almacenamiento total, y no sólo el inicial, no dependen de la intensidad de lluvia ensayada.

Por último, en la Figura 74 se muestra la comparativa entre el volumen medio de almacenamiento total en todos los ensayos realizados sobre las secciones de OASIS® (zonas A y B) y el volumen medio de almacenamiento inicial (zona A), en función del espesor de la capa de OASIS®.

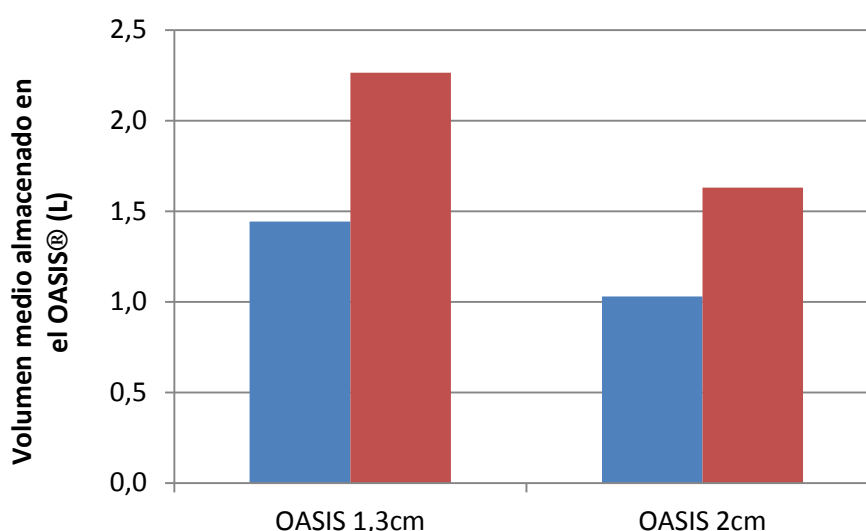


Figura 74. Volumen medio almacenado en el OASIS® en función de su espesor, comparando el volumen almacenado en la zona A (columna izquierda) y el volumen total almacenado entre las zonas A y B (columna derecha).



El porcentaje de volumen de agua almacenada inicialmente (zona A) en el OASIS 1.3 con respecto del total (zonas A y B) es de 71,26%. Mientras que en el caso de OASIS 2.0 este mismo porcentaje fue de 71,96%. Por otra parte, el aumento de 0,7 cm en el espesor de la capa de OASIS® produjo un aumento de un 36,87% en el volumen almacenado inicialmente (zona A) por el OASIS®, mientras que en el almacenamiento total (zonas A y B) el aumento fue de 36,25%. Este análisis confirma que el material tiene un comportamiento hidráulico único que mejora proporcionalmente con el incremento del espesor.

### 4.3 ENSAYO DE MEDIDA DE LA DRENABILIDAD DE SUPERFICIES DE HORMIGÓN POROSO Y ASFALTO POROSO

#### 4.3.1 ENSAYOS DE MEDIDA DE LA DRENABILIDAD EN LABORATORIO

A continuación se hace un breve resumen de la metodología de ensayo seguida en laboratorio con el permeámetro LCS a modo de recordatorio (ver capítulo de metodología). Se utilizaron dos metodologías de toma de medidas diferenciadas según el escenario de colmatación. Se comenzó por tomar tres medidas en el centro de las superficies permeables de aglomerado poroso recién construidas en ambas caras de las probetas y antes de ser dispuestas en el ICF. De esta forma se obtuvieron los datos de permeabilidad de dichas probetas para el escenario inicial de colmatación, el cual permitirá obtener después la reducción en la capacidad de infiltración tras la colmatación de las probetas.

Se presentan los resultados promedio obtenidos de los seis ensayos llevados a cabo mediante el uso del LCS en ambas caras (tres por cara) de las probetas de hormigón poroso en la Tabla 35. De igual forma se presentan los valores de la densidad aparente de las probetas utilizadas.

Tabla 35. Valores de la permeabilidad de las probetas de hormigón poroso reforzado con polímeros obtenidos mediante el uso del permeámetro LCS.

Probeta	Peso (kg)	Volumen (m <sup>3</sup> )	Densidad aparente (kg/m <sup>3</sup> )	Permeabilidad media (m/s)
1	44,950	0,025	1798	0,0239
2	44,400	0,025	1776	0,0201
3	44,000	0,025	1760	0,0074
<b>Media</b>			<b>1778</b>	<b>0,0172</b>

El valor medio de la permeabilidad obtenido en la Tabla 35 fue utilizado como referente para obtener la reducción de la capacidad de infiltración en las probetas de hormigón poroso tanto en laboratorio como en campo.

El mismo método de ensayo fue utilizado para las probetas de asfalto poroso, obteniéndose los resultados que pueden verse en la Tabla 36, con sus respectivas densidades aparentes.

Tabla 36. Valores de la permeabilidad de las probetas de asfalto poroso PA-16 obtenidos mediante el uso del permeámetro LCS.

Probeta	Peso (Kg)	Volumen (m <sup>3</sup> )	Densidad aparente (Kg/m <sup>3</sup> )	Permeabilidad media (m/s)
1	54,200	0,025	2168	0,0110
2	56,000	0,025	2240	0,0130
3	51,300	0,025	2052	0,0119
<b>Media</b>			<b>2153</b>	<b>0,0120</b>

Igualmente, los valores medios que se muestran en la Tabla 36 fueron utilizados para obtener la reducción de la capacidad de infiltración en las superficies permeables de aglomerado poroso de asfalto tanto en laboratorio como en campo.

Como primer hecho reseñable que se desprende de los resultados (Tabla 35 y Tabla 36), existe una clara diferencia de permeabilidad entre ambas superficies permeables de aglomerado poroso. El hormigón poroso utilizado en esta investigación presentó un 40% más de capacidad de infiltración que el asfalto poroso PA-16. En ambos casos se cumplió con el criterio de Pérez y Calzada (1990) consistente en que una superficie de aglomerado poroso recién construida debe presentar un tiempo de medición del ensayo con el LCS inferior a 50 segundos (permeabilidad de 0,0050 m/s), estando preferiblemente en un rango de entre 25 y 35 segundos (permeabilidad de 0,0100 y 0,0071 m/s respectivamente).

Una vez descritas las características de permeabilidad de las probetas recién fabricadas de ambos tipos de superficie de aglomerado poroso, se procedió a la ejecución de los ensayos con el LCS sobre las mismas probetas una vez colmatadas y ensayadas en el ICF bajo las condiciones descritas anteriormente. Durante el ensayo de la superficie

colmatada, el impacto de las gotas de la lluvia simulada sobre las superficies generaron las dos zonas de colmatación diferenciadas, mostradas en la Figura 51. Una vez finalizados los ensayos con el ICF, se llevó a cabo un método más exhaustivo de medida de la drenabilidad de las superficies resultantes, tomando 24 puntos con 3 repeticiones cada uno en la parte superior de las probetas (12 puntos por cada zona de colmatación identificada).

A continuación, se muestran en la Tabla 37 los resultados promedio de la permeabilidad de cada zona de colmatación acompañados de la reducción en la capacidad de infiltración en dichas zonas respecto a la referencia inicial común. Se indican dos zonas fundamentales:

- Zona sin lavar, la cual corresponde a la zona colmatada de la superficie donde las gotas de lluvia no han limpiado la superficie por haber entrado en contacto con la superficie permeable de forma más prolongada en otros lugares.
- Zona lavada, la cual corresponde con la zona donde las gotas de lluvia han caído de forma más regular durante los ensayos, provocando la limpieza de las mismas.

Tabla 37. Resultados de permeabilidad y pérdida de la capacidad de infiltración en las probetas de hormigón poroso.

Probeta	Zona	Permeabilidad (m/s)	Pérdida de permeabilidad (%)
1	Sin lavar	0,0096	44,00
	Lavada	0,0167	2,84
2	Sin lavar	0,0080	53,24
	Lavada	0,0149	13,02
3	Sin lavar	0,0088	48,92
	Lavada	0,0165	4,00
Valor medio			27,67

Se comprueba que la permeabilidad ha descendido un 27,67% de promedio para este tipo de superficie porosa, quedando dividido de forma muy clara en dos zonas de distinta capacidad de infiltración. Por un lado, la zona donde han caído las gotas presenta

un comportamiento muy similar a una superficie recién construida, presentando un descenso medio de la permeabilidad de un 5,62%. Por otro lado, la zona que continúa con sedimentos en la superficie (sin lavar por la acción directa de las gotas) presenta un descenso significativo del 48,72%. Estos resultados afianzan la hipótesis de la influencia de las gotas de lluvia sobre la permeabilidad de una superficie de aglomerado poroso colmatada, fundamentalmente debida al hecho de que una colmatación superficial, como la obtenida con el método de aporte de sedimentos empleado en esta tesis, al no penetrar en los huecos, es fácilmente lavada por los impactos de las gotas de agua.

En la Tabla 38 se muestran los resultados obtenidos para las probetas de asfalto poroso, registrándose un descenso más pronunciado de la capacidad de infiltración hasta un 61,58%, que en el caso de las probetas de hormigón poroso, siempre bajo la misma metodología de colmatación. Si la diferencia entre ambas superficies permeables fue de un 40,00% para las superficies recién construidas, en el caso de las mismas superficies tras colmatación y ensayo esta diferencia fue del 58,33%. Por lo tanto, se observa una mayor afección de la colmatación superior ensayada en el caso de las superficies permeables de asfalto poroso que en el caso de las superficies de hormigón poroso.

Tabla 38. Resultados de permeabilidad y pérdida de la capacidad de infiltración en las probetas de asfalto poroso.

Probeta	Zona	Permeabilidad (m/s)	Pérdida de permeabilidad (%)
1	Sin lavar	0,0024	79,62
	Lavada	0,0040	66,57
2	Sin lavar	0,0045	62,67
	Lavada	0,0081	32,61
3	Sin lavar	0,0033	72,20
	Lavada	0,0053	55,82
Valor medio			61,58

El descenso promedio de la capacidad de infiltración registrado en las probetas de asfalto poroso (Tabla 38) fue del 71,5% en el caso de la zona colmatada y del 51,67% en la zona de caída de las gotas de agua. Estos descensos en las dos zonas de estudio fueron más significativos y similares entre sí que en el caso de las probetas de hormigón, donde la zona lavada apenas sufrió descenso alguno.

Se puede concluir por tanto que las permeabilidades de las superficies permeables de aglomerado poroso (hormigón y asfalto) colmatadas con el método de adición de sedimentos empleado en esta tesis, se vieron altamente influenciadas de forma positiva por el impacto de las gotas de agua del simulador de lluvia empleado en laboratorio, si bien mostraron dos comportamientos distintos en función de la superficie. Mientras que en el caso del hormigón poroso, el impacto de las gotas de agua retiró parte del sedimento colmatante, recuperando prácticamente la capacidad de infiltración de la superficie recién construida, el mismo efecto propició una recuperación menor en la capacidad de infiltración en las probetas de asfalto poroso.

#### 4.3.2 ENSAYOS DE MEDIDA DE LA DRENABILIDAD EN CAMPO

Tal y como se expuso en el capítulo de metodología, fueron tomados un total de 81 puntos de medida divididos en 9 plazas de aparcamiento por cada una de las dos superficies permeables de aglomerado poroso analizadas. Por lo tanto, fueron llevados a cabo un total de 162 ensayos con el permeámetro LCS sobre las superficies de hormigón poroso y asfalto poroso del aparcamiento experimental de las “Las Llamas” en Santander. Los resultados de este ensayo pueden verse en el Anexo 3.

Cabe destacar que todos los valores de la reducción de la capacidad de infiltración obtenidos en este punto fueron comparados con la referencia de los valores iniciales de la permeabilidad de las probetas de hormigón poroso y asfalto poroso obtenidos en laboratorio, recogidos en la Tabla 35 y en la Tabla 36.

Comenzando por un análisis descriptivo de los resultados, en la Tabla 39 y en la Tabla 40 se muestran los valores de la permeabilidad obtenida en cada zona de la plaza, así como la reducción en la capacidad de infiltración y la calificación que recibe cada zona, según los rangos recogidos en la Tabla 9, para el caso de la superficie de hormigón poroso y asfalto poroso, respectivamente.

Tabla 39. Valores promedio de la permeabilidad media y de la reducción de la capacidad de infiltración en cada zona de estudio de las plazas de aparcamiento ejecutadas con superficies permeables de hormigón poroso y calificación de su comportamiento en permeabilidad.

Zona	Permeabilidad media (m/s)	Calificación del comportamiento en permeabilidad	Reducción de la capacidad de infiltración (%)
1	0,0041	Apreciable	79,65
2	0,0069	Recién construida	65,62
3	0,0047	Apreciable	76,45
4	0,0031	Apreciable	84,47
5	0,0054	Recién construida	73,22
6	0,0025	Apreciable	87,62
7	0,0039	Apreciable	80,67
8	0,0040	Apreciable	79,97
9	0,0026	Apreciable	87,24
<b>Media</b>	<b>0,0041</b>	<b>Apreciable alto</b>	<b>79,43</b>

En el caso de la superficie de hormigón poroso cabe destacar las altas calificaciones medias obtenidas por las zonas de estudio, recibiendo las calificaciones más altas la zona situada entre las ruedas delanteras de los vehículos (zona 2) y la zona media del aparcamiento entre las 4 ruedas de los vehículos (zona 5). Ambas zonas recibieron la consideración de superficie recién construida por tener una permeabilidad muy alta según el criterio de la Tabla 12. El resto de zonas obtienen una buena calificación de “permeabilidad apreciable” que permite concluir que a pesar de registrarse un descenso significativo en la capacidad de infiltración de todas las zonas analizadas, el comportamiento en cuanto a la permeabilidad de las zonas de estudio continúa siendo bueno o muy bueno en los casos de las zonas 2 y 5.

Cabe destacar igualmente que las zonas más afectadas por el descenso de la capacidad de infiltración dentro de las plazas de aparcamiento fueron aquellas zonas situadas bajo las ruedas de los vehículos (zonas 1 y 3 para las ruedas delanteras y zonas 7 y 9 para las ruedas traseras). Se observó además un comportamiento similar en las zonas situadas entre las ruedas de las filas izquierda y derecha (zonas 5 y 6). Sin embargo, los valores más altos de permeabilidad se registraron en las zonas que quedaron entre las ruedas de los vehículos (zonas 2, 5 y 8).

Tabla 40. Valores promedio de la permeabilidad media y de la reducción de la capacidad de infiltración en cada zona de estudio de las plazas de aparcamiento ejecutadas con superficies permeables de asfalto poroso y calificación de su comportamiento en permeabilidad.

<b>Zona</b>	<b>Permeabilidad media (m/s)</b>	<b>Calificación del comportamiento en permeabilidad</b>	<b>Reducción de la capacidad de infiltración (%)</b>
1	0,0020	Regular	83,52
2	0,0027	Apreciable	77,46
3	0,0021	Regular	82,40
4	0,0022	Regular	81,70
5	0,0030	Apreciable	74,85
6	0,0021	Regular	82,57
7	0,0017	Regular	85,61
8	0,0018	Regular	85,05
9	0,0018	Regular	85,23
<b>Media</b>	<b>0,0022</b>	<b>Regular alto</b>	<b>82,04</b>

En el caso de la superficie de asfalto poroso (Tabla 40), las zonas que presentan los mejores valores de permeabilidad dentro de las 9 plazas (permeabilidad apreciable) son las zonas 2 y 5, como ocurrió en el caso de la superficie de hormigón poroso. Igualmente las zonas bajo las ruedas de los vehículos (zonas 1, 3, 7 y 9) presentaron en esta superficie una mayor pérdida de la capacidad de infiltración. Su calificación fue de regular, estando cercana a permeabilidad pobre o deficiente en los casos de las zonas 7 y 9 correspondientes a las ruedas traseras del vehículo. Las zonas 4 y 6, como ya ocurriera en el caso de las plazas de hormigón poroso, presentaron valores de permeabilidad bajos, cercanos a las zonas bajo las ruedas del vehículo.

La primera conclusión que se extrae de la comparación entre la Tabla 39 y la Tabla 40 es que las plazas de aparcamiento ejecutadas con hormigón poroso presentan un valor de permeabilidad media de casi el doble (0,0041 m/s en el hormigón poroso y 0,0022 m/s en el asfalto poroso) que aquellas plazas construidas con asfalto poroso (ver Figura 75). Este hecho viene confirmado por la calificación media que reciben ambas superficies, siendo considerada la permeabilidad de las plazas de aparcamiento de hormigón poroso como apreciable alto (Tabla 39) y las de asfalto poroso como regular alto (Tabla 40). Esta última calificación denota que tras 5 años de puesta en obra del aparcamiento, las plazas de asfalto poroso comienzan a presentar un ligero deterioro de su comportamiento en



infiltración, mayor que el experimentado por las plazas de hormigón poroso.

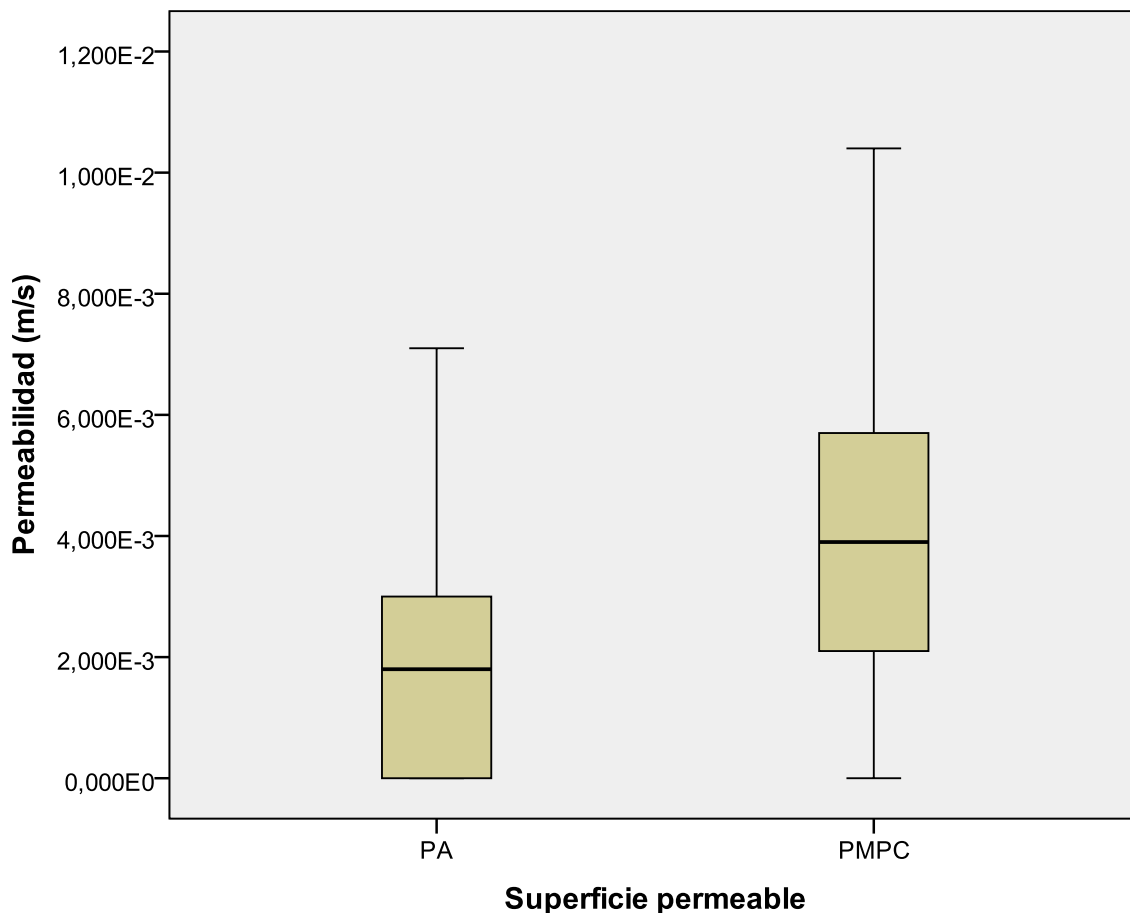


Figura 75. Valores de la permeabilidad registrados en las superficies de asfalto poroso (PA) y hormigón poroso reforzado con polímeros (PMPC) en el aparcamiento experimental mediante el uso del LCS.

No obstante, el deterioro o pérdida de la capacidad de infiltración en ambas superficies es prácticamente idéntico, habiendo descendido ambas superficies de forma similar respecto a la permeabilidad inicial respectiva. El descenso es del 79,43% en el caso del hormigón poroso y del 82,04% en el caso del asfalto poroso como puede apreciarse en la Tabla 39, en la Tabla 40 y en la Figura 76. No obstante, existe un contraste con respecto a los resultados obtenidos en laboratorio, mostrando éstos un deterioro de la capacidad de infiltración más elevado en las superficies de asfalto poroso.

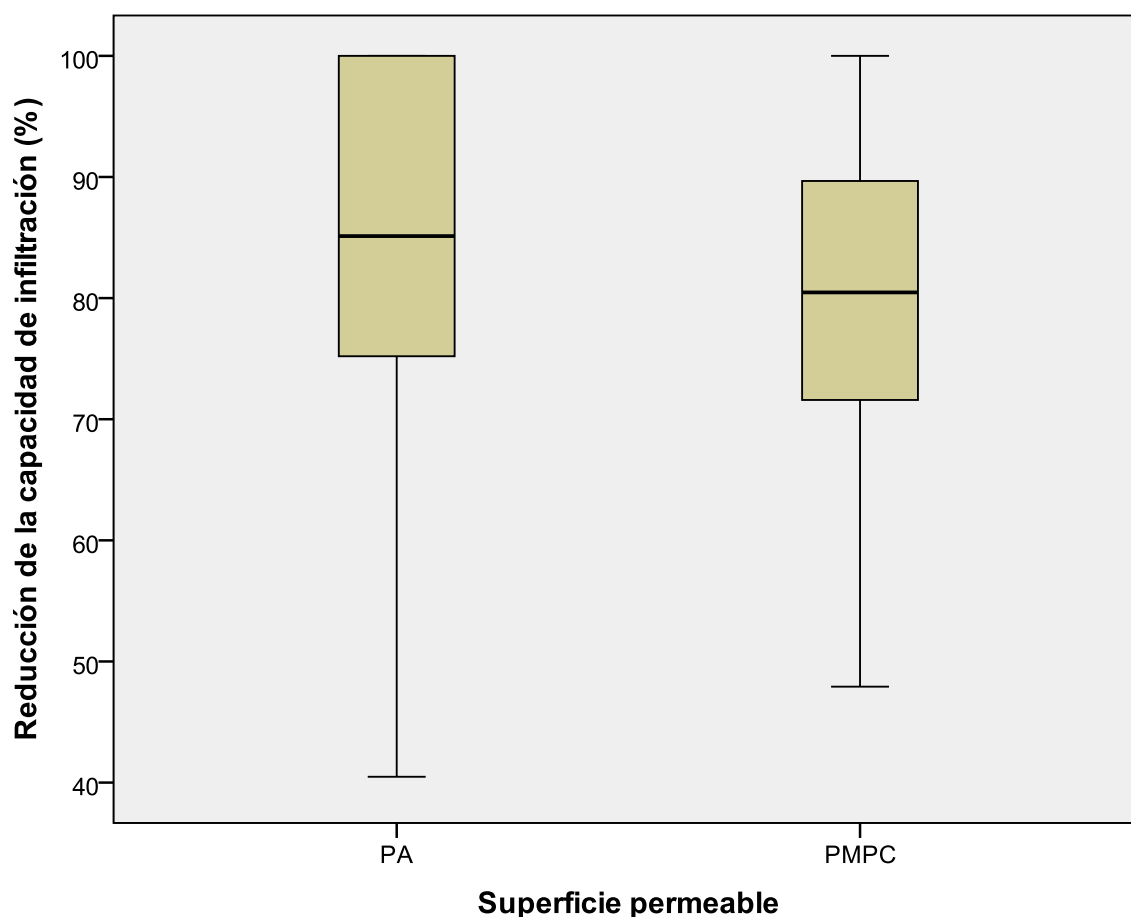


Figura 76. Valores de la reducción de la capacidad de infiltración en la superficie de asfalto poroso (PA) y de hormigón poroso reforzado con polímeros (PMPC).

Una vez finalizado el análisis descriptivo en detalle del comportamiento en infiltración de los firmes permeables en campo, a través de los resultados del LCS mostrados con anterioridad, se pasa al análisis estadístico de los mismos.

Se realizan dos análisis estadísticos distintos para los resultados obtenidos en campo con el LCS. Con ello se pretende analizar por un lado si el tipo de superficie permeable utilizada en el firme permeable del aparcamiento tiene influencia sobre los valores registrados de permeabilidad y de reducción de la capacidad de infiltración, y si ésta es significativa. Por otra parte, se pretende comprobar si se cumple la hipótesis de influencia de la zona de medida en los valores de la permeabilidad y la reducción de la capacidad de infiltración. Esta hipótesis equivaldría a afirmar que el paso del tiempo, y por tanto, la carga estática de los vehículos aparcados influye generando algún tipo de deterioro en el valor de la permeabilidad, siendo posible su localización.

Basándose en las pretensiones anteriores, se plantea un análisis estadístico para comprobar si existía una relación lineal entre los valores de permeabilidad obtenidos con el LCS en las plazas de aparcamiento ensayadas y el tipo de superficie permeable de las secciones de firme permeable. De igual forma se repetirá dicho análisis para estudiar la posible relación lineal entre la permeabilidad y las zonas de estudio seleccionadas anteriormente. Para ello se llevará a cabo un análisis de la correlación bivariada mediante la Rho de Spearman. Una vez analizados los resultados, se realizará un análisis de la normalidad de ambas variables dependientes (permeabilidad y reducción de la capacidad de infiltración), y en función de sus resultados, se plantearán una serie de análisis estadísticos encaminados a corroborar los resultados obtenidos en el análisis de las correlaciones bivariadas. El esquema de análisis estadístico a seguir es el mostrado en la siguiente figura esquemática, teniendo en cuenta que las muestras obtenidas son independientes.

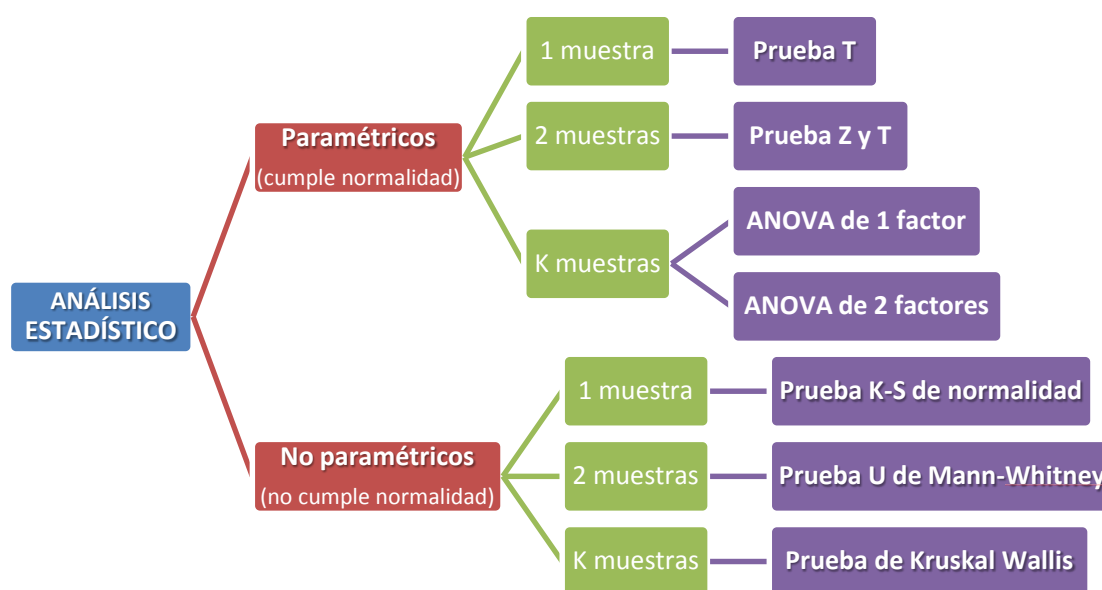


Figura 77. Esquema del análisis estadístico seguido en función del cumplimiento o no de la normalidad por parte de las variables dependientes permeabilidad y reducción de la capacidad de infiltración, teniendo en cuenta que las muestras son independientes.

Por tanto, el punto de partida del análisis estadístico pasa por la comprobación de la existencia de una correlación entre los valores de permeabilidad obtenidos con el permeámetro LCS con el tipo de superficie permeable de aglomerado poroso y con la zona de medida, respectivamente. En la Tabla 41 se muestran los resultados del análisis de correlación bivariada que se realizó entre las distintas variables objeto de estudio.

Tabla 41. Valores del coeficiente Rho de Spearman para el análisis de la correlación bivariada entre los valores de la permeabilidad obtenidos mediante el LCS con el tipo de superficie permeable de aglomerado poroso y con la zona de medida.

		Tipo de superficie	Zona de medida
<b>Permeabilidad</b>	Coeficiente de correlación	0,369**	- 0,168*
	Significación (Bilateral)	0,000	0,033
** La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).			
* La correlación es significativa al nivel 0,05 (bilateral).			

Se comprueba que existe una alta correlación entre el valor de la permeabilidad obtenida con el LCS sobre las superficies de aglomerado poroso después de 5 años desde su puesta en obra y el tipo de superficie de aglomerado poroso, siendo esta significativa al nivel 0,01 (bilateral) para un nivel de confianza del 99% (Tabla 41). También existe una relación significativa entre el valor de la permeabilidad obtenida mediante el LCS sobre las superficies de aglomerado poroso después de 5 años desde su puesta en obra y la zona de medida de cada plaza, siendo significativa al nivel 0,05 (bilateral). De entre estas dos relaciones, la que presentó un mayor coeficiente de correlación fue la existente entre el valor de la permeabilidad y el tipo de superficie de aglomerado poroso.

Un análisis similar al anterior se realizó sustituyendo el valor de la permeabilidad de las superficies de aglomerado poroso obtenida mediante el uso del LCS por la reducción de la capacidad de infiltración de las superficies respecto a la referencia inicial medida en laboratorio para cada superficie. Para ello se realizó el análisis de correlaciones bivariadas entre los valores de la reducción de la capacidad de infiltración de las superficies de aglomerado poroso estudiadas con el tipo de superficie y con la zona de medida en cada plaza.

Tabla 42. Valores del coeficiente Rho de Spearman para el análisis de la correlación bivariada entre los valores de la reducción de la capacidad de infiltración con el tipo de superficie permeable de aglomerado poroso y con la zona de medida.

		Reducción de la capacidad de infiltración	Tipo de superficie	Zona de medida
Reducción de la capacidad de infiltración	Coeficiente			
	de	1,000	- 0,149*	0,169*
	correlación			
infiltración	Significación	—	0,058	0,031
	(Bilateral)			
* La correlación es significativa al nivel 0,05 (bilateral).				

La relación resultó positiva entre la reducción de la capacidad de infiltración y la zona de medida, siendo significativa al nivel 0,05 (bilateral) para un nivel de confianza del 95% (Tabla 42). Sin embargo, no probó que existiese correlación entre reducción de la capacidad de infiltración y el tipo de superficie de aglomerado poroso, refrendando la casi nula diferencia existente entre la reducción media de la capacidad de infiltración entre la superficie de hormigón poroso y la superficie de asfalto poroso puesta ya de manifiesto en la Figura 76 y en la Tabla 39 y la Tabla 40. Dicha reducción similar se puede deber a que ambas superficies se encuentran bajo las mismas condiciones de aporte de sedimentos, la misma ocupación de vehículos, y las mismas precipitaciones. Comparando esta conclusión parcial con la obtenida en laboratorio, se puede afirmar que la colmatación simulada en laboratorio afectó más al asfalto poroso, mientras que la colmatación real en el aparcamiento de “Las Llamas” afectó por igual a las dos superficies, si bien sería necesario haber contado con datos de las permeabilidades iniciales de las superficies del aparcamiento para corroborar esta afirmación.

El siguiente paso del análisis estadístico consistió en determinar la existencia o no de la relación entre las zonas de medida de cada plaza, para cada superficie de aglomerado poroso por separado, con el valor de la permeabilidad y con el valor de la reducción de la capacidad de infiltración. El resultado de este estudio puede verse en la Tabla 43.

Tabla 43. Valores de los coeficientes de la Rho de Spearman para el análisis de la correlación bivariada entre las zonas

de medida de cada plaza de aparcamiento en función del tipo de superficie de aglomerado poroso con los valores de la permeabilidad y con la reducción de la capacidad de infiltración.

Tipo de superficie		Permeabilidad	Reducción de la capacidad de infiltración
<b>Hormigón poroso</b>	Coefficiente de correlación	- 0,281*	0,280*
	Significación (Bilateral)	0,011	0,011
<b>Asfalto poroso</b>	Coefficiente de correlación	- 0,067	0,068
	Significación (Bilateral)	0,554	0,548

\* La correlación es significativa al nivel 0,05 (bilateral).

Para el caso de la superficie de hormigón poroso, se comprobó que existe una relativamente alta correlación entre las zonas de medida en cada plaza y los valores obtenidos tanto de la permeabilidad, obtenidos con el LCS, como de la reducción de la capacidad de infiltración, siendo estas relaciones significativas para un nivel de confianza del 95%. Estos resultados implican que existe una zonificación de la permeabilidad en la superficie de hormigón poroso después de 5 años de funcionamiento, expresada mediante la reducción de la capacidad de infiltración. Esta conclusión viene a reafirmar el análisis descriptivo llevado a cabo utilizando la Tabla 39, en la que se aprecian diferencias significativas entre los valores de la permeabilidad dependiendo de si éstos se midieron en las zonas de influencia de las ruedas del vehículo o se midieron en las zonas que quedan entre las ruedas del mismo. Dicha situación permitiría asumir que el peso estático de las ruedas de los vehículos, combinado con los esfuerzos tangenciales asociados a las maniobras de arranque, frenado y giro de las ruedas, degradan parcialmente la superficie de hormigón de poroso generando una reducción en la capacidad de infiltración de dicha superficie.

Por el contrario, estas relaciones no se cumplieron para el caso del asfalto poroso, comprobándose la no existencia de correlación para esta superficie entre las zonas de medida en cada plaza y los valores tanto de permeabilidad, obtenidos con el LCS, como de la reducción de la capacidad de infiltración. Este resultado reafirma lo ya aventurado en el análisis descriptivo de los resultados mostrados en la Tabla 40, acerca de la gran

similitud entre las permeabilidades de la superficie en todas las zonas de medida. Por lo tanto, se puede afirmar que no existe una zonificación de la permeabilidad en la superficie de asfalto poroso tras 5 años de funcionamiento en el aparcamiento de “La Llamas”, el cual tiene un alto uso por parte de vehículos ligeros, con una ocupación del 100% durante todo el año. Continuando con el razonamiento dado para la superficie de hormigón poroso, esto implicaría que la superficie de asfalto poroso puede resistir mejor las cargas y esfuerzos tangenciales asociados a las ruedas de los vehículos que las superficies de hormigón poroso reforzado con polímeros utilizada en este aparcamiento.

Para comprobar los resultados obtenidos con el estudio de las correlaciones bivariadas, se continuó con el análisis de la normalidad de las variables permeabilidad y reducción de la capacidad de infiltración, utilizando el test de Kolmogorov-Smirnov. El resultado fue que ambas variables no se distribuyeron acorde a una distribución normal. Por tanto, se llevaron a cabo análisis no-paramétricos de significancia, utilizando el test de Mann-Whitney para el tipo de superficie de aglomerado poroso (dos muestras: hormigón poroso y asfalto poroso), y el test de Kruskal Wallis para las zonas de medida (9 muestras: zonas de la 1 a la 9), cuyos resultados se muestran en la Tabla 44.

Tabla 44. Test de significancia de Mann-Whitney y de Kruskal Wallis para las variables permeabilidad y reducción de la capacidad de infiltración en función del tipo de superficie de aglomerado poroso.

Test de Significancia		Permeabilidad	Reducción de la capacidad de infiltración
Mann-Whitney*	U de Mann-Whitney	1888,5	2716,5
	Significancia asintótica	0,000	0,058
Kruskal Wallis**	Chi cuadrado	12,493	13,329
	Significancia asintótica (bilateral)	0,131	0,101

\* Variable de agrupación: tipo de superficie permeable de aglomerado poroso.

\*\* Variable de agrupación: zona de medida.

Los test mostrados en la Tabla 44 demostraron que el tipo de superficie de aglomerado poroso influyó significativamente en los resultados de permeabilidad, mientras que ni el tipo de superficie ni la zona de medida influyeron en la reducción de la capacidad de infiltración.

Una vez confirmada la influencia del tipo de superficie de aglomerado poroso, quedaría por analizar la influencia real de las zonas de medida en cada una de las superficies de aglomerado poroso por separado. Con este objetivo, se comprobaron la normalidad y la homocedasticidad de las variables permeabilidad y reducción de la capacidad de infiltración como paso inicial. La superficie de hormigón poroso se distribuyó acorde a una distribución normal y homocedástica, mientras que en el caso de la superficie de asfalto poroso, ésta no tuvo una distribución normal. Por lo tanto, se utilizó un ANOVA de un factor para el análisis de la influencia de las zonas de medida en la superficie de hormigón poroso, y un test de Kruskal Wallis para analizar la influencia de las zonas de medida en la superficie de asfalto poroso (Tabla 45).

Tabla 45. Test de significancia de ANOVA de un factor y Kruskal Wallis para las variables permeabilidad y reducción de la capacidad de infiltración de una superficie en función de las zonas dentro de la plaza de aparcamiento.

Tipo de superficie (Análisis estadístico)		Permeabilidad	Reducción de la capacidad de infiltración
PMPC (ANOVA de un factor)	F	2,739	2,751
	Significancia (bilateral)	0,011	0,010
PA (Kruskal Wallis)	Chi cuadrado	4,397	4,522
	Significancia (bilateral)	0,820	0,807
Grouping variable: measurement zone.			

Los resultados presentados en la Tabla 45 demostraron la influencia de la zona de medida sobre los valores de la permeabilidad y la reducción de la capacidad de infiltración en la superficie de hormigón poroso reforzado con polímeros tras 5 años de funcionamiento. Sin embargo, ninguna influencia fue identificada sobre la superficie de asfalto poroso, validándose las conclusiones comentadas previamente acerca de la mayor resistencia de esta superficie a la acción de los neumáticos, probablemente debido a la mayor resistencia otorgada por el betún modificado que fue empleado en el asfalto poroso que por los polímeros de refuerzo empleados en el hormigón poroso.



## **CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN**



## 5.1 CONCLUSIONES

### 5.1.1 CONCLUSIONES GENERALES

Esta tesis doctoral concluye con el cumplimiento del objetivo fundamental de la misma, habiéndose obtenido un análisis completo de la infiltración en distintas secciones de firmes permeables como sistemas de captación del agua de lluvia para el control en origen de la escorrentía urbana con el fin de minimizar inundaciones, a través de todas las metodologías de laboratorio y de campo diseñadas y desarrolladas en esta investigación.

Además, se comprobaron las hipótesis de partida de la tesis:

- Las distintas superficies permeables analizadas presentaron diferentes comportamientos bajo distintas condiciones, lo que permitió su caracterización hidráulica.
- La capacidad de infiltración de un pavimento permeable se ve afectada por variables como la distancia de infiltración y la pendiente del pavimento, y no solo por el escenario de colmatación.
- Los firmes permeables analizados en la tesis, tanto en laboratorio como en campo, presentan una alta capacidad de captación e infiltración del agua de lluvia, pudiendo ser utilizados como elementos de atenuación de los caudales punta de escorrentía superficial y para disminuir los problemas generados por las inundaciones.
- Es posible diagnosticar de forma inequívoca el estado de colmatación de un firme permeable en un momento determinado del tiempo mediante el uso de los ensayos de laboratorio y de campo descritos en esta tesis.
- Se comprobó que las gotas de lluvia influyeron sobre la permeabilidad de las superficies de aglomerado poroso, ya que al no penetrar los sedimentos colmatantes con facilidad en dichas superficies, los impactos de las gotas de lluvia pudieron lavar la superficie.
- Se comprobó que los vehículos aparcados sobre una plaza ejecutada con firme permeable mediante hormigón poroso influyen en la capacidad de infiltración del mismo, tras observar la zonificación existente en dichas plazas. Dicha hipótesis no tuvo validez en las plazas de asfalto poroso.

### 5.1.2 CONCLUSIONES PARTICULARES

Las conclusiones particulares obtenidas en esta tesis han dado una respuesta positiva a los objetivos particulares que se plantearon al inicio de la misma, en la forma que puede apreciarse a continuación:

- El estudio del estado del arte de la tesis dictaminó que los firmes permeables más utilizados a nivel mundial son aquellos con hormigón poroso en superficie, seguidos por los adoquines de hormigón impermeables en disposición permeable, y en tercer lugar por las superficies de asfalto poroso, centrando el desarrollo de esta tesis en el estudio del fenómeno de infiltración en dichas superficies.
- La metodología de laboratorio utilizada permite analizar la escorrentía superficial generada en distintas superficies permeables bajo distintas condiciones de colmatación y pendiente del pavimento.
- Los ensayos de laboratorio y la correspondiente metodología utilizada permiten el análisis de la capacidad de infiltración de pavimentos permeables bajo todo tipo de intensidades de lluvia, duración de evento de lluvia, y condiciones de colmatación.
- La metodología de ensayos desarrollada en esta tesis permite el análisis de la funcionalidad hidráulica de un firme permeable, y su validación correspondiente mediante el estudio de una nueva capa de separación entre la base y la sub-base del firme permeable.
- La metodología de ensayos de campo usando el permeámetro LCS y el análisis estadístico sugerido en la tesis permiten diagnosticar el comportamiento hidráulico de un firme permeable después de varios años de uso.

Las conclusiones particulares corresponden al análisis del estado del arte y a la discusión de los resultados de cada uno de los ensayos realizados en la tesis.

#### 5.1.2.1 Estado del arte

1. Los firmes permeables son uno de los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) más utilizados en el mundo, destacando su porcentaje de aplicación en los estudios llevados a cabo en los últimos años, representando un 60% del total de los estudios sobre SUDS.

2. Las superficies permeables más utilizadas a nivel mundial son la de hormigón poroso con un 61%, adoquines impermeables de hormigón con ranuras con un 17% y asfalto poroso con un 16%, seguida de las superficies de césped reforzado con un 4%.

#### **5.1.2.2 Ensayo de medida de la capacidad de infiltración de un pavimento permeable en laboratorio**

1. El nuevo diseño del Infiltrómetro Cántabro Fijo (ICF) permite la simulación de lluvia directa y de escorrentía superficial en laboratorio sobre probetas de pavimento permeable de forma muy precisa y para un amplio rango de intensidades de lluvia que van desde los 10 mm/h hasta los 150 mm/h.
2. El tipo de superficie permeable influyó de forma significativa sobre los valores de las tasas de infiltración acumulada, obteniéndose diferentes modelos de regresión lineal para cada una de ellas, lo que explica un comportamiento claramente diferenciado, especialmente entre las superficies de adoquines con ranuras y las superficies de aglomerado poroso.
3. El escenario de colmatación influyó de forma significativa en los valores de las tasas de infiltración acumulada en el caso de las superficies de adoquines de hormigón impermeable colocados en disposición permeable, no mostrando una influencia significativa en las superficies de aglomerado poroso (hormigón poroso reforzado con polímeros y asfalto poroso).
4. Las superficies de aglomerado poroso no se ven afectadas de forma significativa por los sedimentos.
5. Las variables distancia de infiltración y pendiente de la superficie permeable mostraron una alta y significativa relación con las tasas de infiltración acumulada para todos los tipos de superficie permeable empleadas. Un aumento en los valores de la variable distancia de infiltración implica un aumento de las tasas de infiltración acumulada, mientras que un aumento de los valores de la pendiente de las superficies permeables (pendiente igual o superior al 3% en el caso de adoquines con ranuras y del 7-10% en el caso de aglomerados porosos) genera un decrecimiento en los valores de las tasas de infiltración y capacidad de infiltración (hasta un 65% en el caso de adoquines con ranuras y 10-15% en el caso de superficies de aglomerado poroso).

6. Los altos valores de  $R^2$  registrados en todos los modelos de regresión lineal obtenidos, siempre por encima de 0,85 muestran el alto grado de eficiencia en la predicción del comportamiento en infiltración de un pavimento permeable, en laboratorio bajo condiciones de ensayo y dentro de los rangos de validez obtenidos para cada modelo.
7. La variable más influyente en todos los modelos de regresión lineal obtenidos para los dos escenarios de colmatación extremos y para todas las superficies permeables estudiadas es la distancia de infiltración.
8. La influencia de la constante en todos los modelos obtenidos fue baja, por lo que las variables de estudio son las principales que rigen el fenómeno de infiltración en pavimentos permeables.
9. Los sedimentos utilizados para colmatar las distintas superficies permeables, así como su sistema de aplicación, aumentaron ligeramente la variabilidad únicamente de los modelos de regresión lineal obtenidos para la superficie permeable de adoquines (al ser la superficie más afectada por la colmatación simulada) pasando de un  $R^2$  de 0,95 sin sedimentos a un  $R^2$  de 0,87 tras la adición de sedimentos.
10. Los sedimentos utilizados disminuyeron ligeramente la variabilidad de los modelos de regresión lineal obtenidos para las superficies de aglomerado poroso (aumento de 0,03 en el valor de  $R^2$  en la superficie de hormigón poroso y de 0,02 en la de asfalto poroso), al no verse estas superficies apenas afectadas por la colmatación simulada.
11. El tipo de superficie permeable utilizada influyó sobre los patrones de generación de escorrentía superficial. Las superficies de adoquines con ranuras se vieron afectadas en mayor medida por el proceso de colmatación, presentando valores cercanos al 65% de escorrentía superficial residual, mientras que las superficies de aglomerado poroso presentaron valores más bajos cercanos al 10-15%.
12. El escenario de colmatación influyó de forma significativa sobre la generación de escorrentía superficial en las superficies permeables de adoquines de hormigón impermeable en disposición permeable, mientras que no influyó en las de aglomerados porosos, dado que los sedimentos no llegaban a bloquear efectivamente la entrada del agua.
13. La pendiente de las superficies permeables influyó de forma más

significativa que la colmatación en la generación de escorrentía superficial en todos los tipos de superficie de aglomerado poroso, aumentando al aumentar esta. No obstante en el caso de las superficies de adoquines con ranuras fue la colmatación la que tuvo una mayor influencia que la pendiente de la superficie.

14. Las labores de mantenimiento llevadas a cabo mediante barrido de sedimentos contribuyeron a una recuperación de la capacidad de infiltración en las superficies de adoquines de hormigón impermeables en disposición permeable, al ser la superficie más afectada por su presencia.
15. Las labores de mantenimiento mediante barrido de los sedimentos en las superficies de aglomerado poroso, provocaron un incremento de la generación de escorrentía superficial (1% en las superficies de hormigón poroso para pendientes inferiores al 10%, y de entre un 7 y un 10% en las superficies de asfalto poroso para pendientes iguales o mayores al 3%) al fomentar la penetración y compactación de los sedimentos en los huecos de estas superficies.
16. A pesar de las similitudes observadas entre ambas superficies de aglomerado poroso en términos de los valores de la escorrentía superficial, las diferencias entre ambas fueron significativas, manteniendo cierta independencia en cuanto a su capacidad de infiltración en laboratorio, siendo la superficie de asfalto poroso la que generó unos valores mayores de la escorrentía superficial residual (16% en los casos de máximas pendientes frente al 7% máximo registrado en el caso de máximas pendientes en las superficies de hormigón poroso).
17. Los sedimentos que pasaron a través de las superficies de aglomerados porosos no supusieron ninguna pérdida de la permeabilidad significativa en el geotextil utilizado en esta investigación por debajo de la base del pavimento permeable.

#### **5.1.2.3 Ensayo del comportamiento hidráulico de un firme permeable en laboratorio**

1. Una sección de firme permeable convencional presenta una infiltración a través de todas sus capas casi instantánea (30 segundos) ante eventos de lluvia extremos ensayados (100, 200 y 400 mm/h).
2. Una sección de firme permeable convencional alcanza el caudal punta de infiltración dentro de los primeros 10 minutos de un evento de lluvia

extremo.

3. Una sección de firme permeable mejorada con una capa de OASIS® presenta tres fases principales de comportamiento: fase de absorción, fase mixta de absorción e infiltración, y fase de infiltración.
4. La capa de OASIS® de menor espesor (1,3 cm) es capaz de absorber un evento completo de lluvia de 15 minutos de duración con intensidades iguales o inferiores a 100 mm/h, sin dejar pasar dicho agua hacia la capa de sub-base.
5. La capa de OASIS® de mayor espesor (2,0 cm) es capaz de absorber un evento de 20 minutos con intensidades iguales o inferiores a 100 mm/h.
6. El OASIS® aporta una capacidad de almacenamiento de 1,444 L para la capa de 1,3 cm de espesor y 2,265 L para la capa de 2 cm de espesor que le permite actuar al mismo tiempo como elemento atenuador de los caudales punta de escorrentía superficial y como elemento de almacenamiento extra de agua de lluvia en el interior de un firme permeable.
7. El 72% del total del volumen almacenado por el OASIS® fue absorbido por éste durante la fase de absorción para todos los espesores estudiados.
8. Un aumento de 0,7 cm en el espesor de la capa de OASIS® produjo un crecimiento cercano al 37% en el volumen total de almacenamiento por dicha capa, lo cual supone algo más de un 1% de incremento en almacenamiento por cada milímetro de incremento del espesor de la capa.
9. La capacidad de almacenamiento del OASIS® podría considerarse independiente de la intensidad de lluvia.
10. Se puede concluir que el OASIS® es capaz de atenuar intensidades de lluvia que rebasarían sobradamente periodos de retorno de 100 años en las ciudades del mundo que presentan unos mayores valores de intensidad de lluvia, incluso en los casos más desfavorables de menor espesor de la capa de OASIS® (1,3 cm) y mayor intensidad de lluvia (400 mm/h). En el resto de ciudades estudiadas, los periodos de retorno estarían entre 100 y 1000 años para las ciudades estudiadas y para una duración de lluvia de 15 minutos.

#### **5.1.2.4 Ensayo de medida de la drenabilidad de superficies de hormigón poroso y asfalto poroso**

1. Los ensayos de medida de la capacidad de infiltración de un firme permeable



en campo usando el permeámetro LCS sirven para diagnosticar lugares reales, limitándose por tanto las conclusiones obtenidas a dicha localización, no siendo posible generalizar a otros lugares antes de analizar dichos lugares que se encuentran bajo diferentes condiciones.

2. Las diferencias de permeabilidad detectadas en el aparcamiento experimental de “Las Llamas” entre ambas superficies de aglomerado poroso continúa siendo significativa después de 5 años de puesta en funcionamiento real en un aparcamiento, siendo la superficie de hormigón poroso reforzado con polímeros la que presenta la mayor permeabilidad inicial y al cabo del tiempo.
3. En el aparcamiento de “Las Llamas”, el tipo de superficie de aglomerado poroso no influye en la reducción de la capacidad de infiltración de las plazas de aparcamiento, estando todas ellas sujetas al mismo aporte de sedimentos, la misma ocupación de vehículos y las mismas precipitaciones.
4. La degradación de las plazas de aparcamiento de hormigón poroso presenta una zonificación debida a la acción de los vehículos, presentando menores permeabilidades en las zonas de rodada después de 5 años de funcionamiento del aparcamiento.
5. La degradación de las plazas de aparcamiento de asfalto poroso no presenta ninguna zonificación después de 5 años de funcionamiento como aparcamiento.

## 5.2 FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Para finalizar esta tesis, se plantean a continuación las principales propuestas de futuras líneas de investigación surgidas del trabajo realizado, las cuales pueden dar lugar a futuros proyectos, tesis doctorales, publicaciones y patentes, ampliando el conocimiento sobre el fenómeno de la infiltración en los firmes permeables:

1. Estudio de la influencia de la intensidad de lluvia y la duración del evento en las tasas de infiltración de distintas secciones de firmes permeables.
2. Estudio de la influencia de nuevos diseños de geotextiles en la atenuación del caudal punta de la escorrentía superficial en un firme permeable.
3. Aplicación de los estudios del comportamiento en infiltración de un firme permeable en otros Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) como los drenes filtrantes o drenes franceses.
4. Estudio de la influencia del OASIS® en la mejora de las cualidades hidráulicas de las secciones de firmes permeables en función de su disposición en el interior del firme.
5. Desarrollo de simuladores de lluvia más precisos para la simulación de eventos de lluvia de cualquier duración e intensidad tanto en laboratorio como en campo.
6. Mejora del Infiltrómetro Cántabro Fijo (ICF) para la simulación de eventos de lluvia de intensidades superiores a 150 mm/h, que es actualmente el límite máximo de intensidad que este dispositivo de laboratorio puede simular.
7. Estudio del perfil de migración de los sedimentos en el interior de un firme permeable a través de todas sus capas en función de la intensidad de lluvia y la duración del evento de la misma.
8. Medida de la evapotranspiración del agua de lluvia almacenada en la sub-base de distintas secciones de firmes permeables en función de distintas condiciones climáticas.
9. Estudio en profundidad de las propiedades hidráulicas y estructurales de nuevos materiales como el OASIS® en la estructura de un firme permeable en base a los resultados de esta tesis.
10. Estudio de la existencia o no de relación lineal entre el aumento de espesor de la capa OASIS® y el aumento de su capacidad de atenuación y

almacenamiento.

11. Análisis y monitorización de la pérdida de la capacidad de infiltración de distintas secciones de firmes permeables en aparcamientos en función de las características de los sedimentos, de su aporte, de las condiciones climatológicas, de precipitaciones, grado de ocupación de vehículos y del número de años desde su puesta en obra.

### 5.3 RESULTADOS CIENTÍFICO ACADÉMICOS DE LA TESIS DOCTORAL

Antes de pasar a los resultados académicos de esta tesis doctoral, se procede a hacer un pequeño repaso a los resultados del proyecto en el cual se enmarca la tesis.

El proyecto “Desarrollo de sistemas de captación y almacenamiento de agua de lluvia, mediante firmes filtrantes en aparcamientos, para usos no potables y como aprovechamiento de energía geotérmica de baja entalpía (VEA)” con referencia BIA2009-08272, financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad del Gobierno de España, y en el cual se encuadró esta tesis finalizó con la consecución de los siguientes resultados:

- 2 tesis doctorales, las cuales cubrieron la totalidad de los objetivos del proyecto:
  - Roque Borinaga Treviño. “Influencia del tipo de árido en las propiedades térmicas y mecánicas de morteros utilizados como relleno geotérmico”. Calificación: Sobresaliente Cum Laude. Universidad de Cantabria. 9 de enero de 2014. Esta tesis cubrió los objetivos relacionados con la geotermia dentro del proyecto.
  - La presente tesis, la cual cubrió los objetivos hidráulicos del proyecto.
- Finalización de la Beca para la Formación del Profesional Investigador (FPI), concedida por el Ministerio de Economía y Competitividad del Gobierno de España al autor de esta tesis.
- 11 artículos científicos publicados en revistas incluidas en el Journal Citations Report (JCR) relacionados con el proyecto.
- 11 contribuciones a congresos y conferencias internacionales.

De entre todos estos resultados científico-técnicos, el autor de la presente tesis contribuyó en la elaboración de las siguientes publicaciones en revistas incluidas en el JCR:

- Sañudo Fontaneda, L.A.; Rodríguez Hernández, J.; Calzada Pérez, M.A.; Castro Fresno, D. (2014). "Infiltration behaviour of polymer-modified porous concrete and porous asphalt surfaces used in SUDS techniques".

CLEAN - Solid, Air, Water, 42 (2), pp. 139-145. ISSN 1863-0650.

- Sañudo-Fontaneda, L.A., Rodríguez-Hernandez, J., Vega-Zamanillo, A., Castro-Fresno, D. (2013). Laboratory analysis of the infiltration capacity of Interlocking Concrete Block Pavements in car parks. *Water Science and Technology*, 67 (3), pp. 675-681. ISSN 0273-1223.
- Castro-Fresno, D., Andrés-Valeri, V.C.A., Sañudo-Fontaneda, L.A., Rodríguez-Hernández, J. (2013). "Sustainable Drainage Practices In Spain, Specially Focused On Pervious Pavements". *Water*, 5 (1), pp. 67-93. ISSN 2073-4441.
- Sañudo-Fontaneda, L.A.; Charlesworth, S.M.; Castro-Fresno, D.; Andres-Valeri, V.C.A.; Rodriguez-Hernandez, J. (2014). "Water quality and quantity assessment of pervious pavements performance in experimental car park areas". *Water Science and Technology*, 69 (7), pp. 1526-1533. ISSN 0273-1223. Aceptado para su publicación.
- Nnadi, E.O.; Coupe, S.J.; Sañudo-Fontaneda, L.A.; Rodriguez-Hernandez, J. (2014). "An evaluation of enhanced geotextile layer in permeable pavement to improve stormwater infiltration and attenuation". *International Journal of Pavement Engineering*. ISSN 1029-8436. Aceptado para su publicación. DOI: 10.1080/10298436.2014.893325.
- Sañudo-Fontaneda, L.A.; Andres-Valeri, V.C.A.; Rodriguez-Hernandez, J.; Castro-Fresno, D. "Field study of the reduction of the infiltration capacity of porous mixtures surfaces". *Water*, 6(3), pp. 661-669. ISSN 2073-4441.

De la misma manera, las contribuciones a congresos y conferencias nacionales e internacionales en el marco de esta tesis fueron las siguientes:

- Luis Ángel Sañudo-Fontaneda, Susanne Charlesworth, Daniel Castro-Fresno, Valerio Carlos Andrés-Valeri, Jorge Rodríguez-Hernandez (23-27 junio 2013). "Experimental pervious pavement parking areas in the North of Spain". 8th International Conference NOVATECH - Planning & technologies for sustainable urban water management. Entidad organizadora: GRAIE. Lugar de celebración: Lyon (Francia).
- Stephen Coupe, Luis Ángel Sañudo-Fontaneda, Ernest Nnadi, Susanne Charlesworth, Jorge Rodríguez-Hernandez, Oyekemi Oyelola (23-27 junio 2013). "New developments in permeable pavement design to improve

water quantity and quality". 8th International Conference NOVATECH - Planning & technologies for sustainable urban water management. Entidad organizadora: GRAIE. Lugar de celebración: Lyon (Francia).

- Luis A. Sañudo-Fontaneda, Daniel Castro-Fresno, Jorge Rodríguez-Hernandez, Angel Vega-Zamanillo, (4-6 septiembre 2012). "Laboratory study of the infiltration performance of three surfacing materials used on permeable pavements". SUDSnet International Conference - Multiple benefits from surface water management. Entidades organizadoras: Sustainable Urban Drainage Systems Network (SUDSnet), Universidad de Abertay-Dundee y Universidad de Coventry. Lugar de celebración: Coventry (Reino Unido).
- Luis A. Sañudo-Fontaneda, Daniel Castro-Fresno, Jorge Rodríguez-Hernandez, (23-24 febrero 2012). "Investigación y desarrollo de firmes permeables para la mitigación de inundaciones y la "Valorización Energética del Agua de Lluvia (VEA)"". VI Congreso Nacional de la Ingeniería Civil. Retos de la Ingeniería Civil. Entidad organizadora: Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Lugar de celebración: Valencia (Comunidad Valenciana), España.
- Luis Ángel Sañudo-Fontaneda, Daniel Castro-Fresno, Jorge Rodríguez-Hernandez, Roque Borinaga-Treviño (11-16 septiembre 2011). "Comparison of the infiltration capacity of permeable surfaces for rainwater energy valorization". 12th International Conference on Urban Drainage (ICUD 2011). Lugar de celebración: Porto Alegre (Brasil).
- Luis Ángel Sañudo-Fontaneda, Daniel Castro-Fresno, Jorge Rodríguez-Hernandez, Francisco Ballester-Muñoz (26-29 octubre 2010). "Rainwater Energy Valorization through the Use of Permeable Pavements in Urban Areas". 37th IAHS World Congress on Housing: Design, Technology, Refurbishment and Management of Buildings. Entidad organizadora: Grupo de Tecnología de la Edificación; International Association for Housing Science. Lugar de celebración: Santander (España).

Actividad docente relacionada con la tesis doctoral:

1. **Sostenibilidad en la construcción.** Asignatura de 4º curso de Ingeniería Civil. Universidad de Cantabria. Lecciones basadas en firmes permeables dentro del

bloque de desarrollo de bajo impacto.

2. **Diseño y construcción de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS).** Asignatura de libre elección para estudiantes de ingeniería. Universidad de Cantabria. Visita de campo al aparcamiento de “Las Llamas”.
3. **Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS).** Curso de verano. Universidad de Cantabria. Lección basada en firmes permeables dentro de la clasificación de los SUDS.

Además, esta tesis opta a la Mención de “Doctor Internacional” del Espacio Europeo de Educación Superior tras la realización de una estancia de 3 meses en 2012 en el Sustainable Drainage Applied Research Group (SUDSARG) de la Universidad de Coventry en el Reino Unido. Como resultado de esa estancia se obtuvieron 2 publicaciones en revistas JCR, 3 contribuciones a conferencias internacionales encuadradas dentro de la presente tesis y una oferta de trabajo como investigador que se materializó en enero de 2014.





**EXTENDED ABSTRACT**



### Thesis title

THE ANALYSIS OF RAINWATER INFILTRATION INTO PERMEABLE PAVEMENTS, WITH CONCRETE  
BLOCKS AND POROUS MIXTURES, FOR THE SOURCE CONTROL OF FLOODING

## 1. INTRODUCTION

### 1.1 FRAMEWORK

Urban growth and city development are pointing out the necessity of a change in the way in which construction works have been carried out up to now. A new philosophy commonly known as sustainable development has been proposed as the answer, and inside it is sustainable construction.

The Construction Technology Applied Research Group (GITECO) of the University of Cantabria, has been developing a major part of its research work, within this philosophy. With this aim, GITECO started the research line named ‘Construction of Sustainable Drainage Systems’ in 2003 with the valuable collaboration and support given from Coventry University.

Many research projects have been undertaken successfully within this research line during the last decade, highlighting those founded by the Spanish Ministry of Science and Innovation and the Spanish Ministry of Economy and Competitiveness:

- “Development of new hydrocarbon biodegrading pavement structures (FIDICA) with reference REN2003-05278/TECNO.
- “Development of new catchment, pre-treatment & in situ treatment systems for hydrocarbon contaminated water coming from urban runoff in parking lots with impervious pavements (TRAPI)” with reference CTM2006-00310.
- “Development of catchment and store rainwater systems, using porous pavements in parking lots, for non-potable use with geothermal low enthalpy energy (VEA)” with reference BIA2009-08272.
- “Hydrological rehabilitation of urban road infrastructures (RHIVU)” with reference BIA2012-32463.

As a result of this continuous research activity within this research line, four Ph.D.

theses had been carried out, obtaining the maximum qualifications and being considered a high standard within the international community of scientists working in this line of sustainable drainage systems:

- "Study, analysis and design of permeable sections of pavements for urban roads with an appropriate behaviour facing blockage and the needed bearing capacity to support light traffic". Rodríguez-Hernández, J. (2008).
- "Analysis of aspects of depuration and degradation of hydrocarbons present in water from urban runoff, at pervious pavement ". Rodríguez-Bayón, J. (2008).
- "Desarrollo de un sistema de captación, pretratamiento y tratamiento in situ, de aguas contaminadas con hidrocarburos procedentes de la escorrentía urbana en aparcamientos con firmes impermeables". Fernández-Barrera, A.H. (2010).
- "Study of an experimental pervious pavement parking area to improve sustainable urban water management through the storage and re-use of rainwater ". Gómez-Ullate, M.E. (2011).

As an important part of the whole work undertaken during these ten years in GITECO, a new laboratory called the Sustainable Urban Drainage Systems Lab (SUDSlab) was created, being the unique laboratory working specifically on Sustainable Urban Drainage Systems (SUDS) in Spain. This facility was possible thanks to the financial support from the Spanish Ministry of Science and Innovation and the Spanish Ministry of Economy and Competitiveness.

The current thesis is frameworked inside one of the projects cited previously, "Development of catchment and store rainwater systems, using porous pavements in parking lots, for non-potable use with geothermal low enthalpy energy (VEA)".

Moreover, the author of this thesis achieved the grant of the FPI fellowship of the Spanish Ministry of Economy and Competitiveness with reference BES-2010-030064. This grant financed the research internship of the author at Coventry University, allowing the author to opt to the PhD title with the "International Doctor" enhancement of the qualification within the European Higher Education Area (EHEA).

## 1.2 OBJECTIVES AND HYPOTHESIS

The main objectives of the project “Development of catchment and store rainwater systems, using porous pavements in parking lots, for non-potable use with geothermal low enthalpy energy (VEA)” with reference BIA2009-08272 in which this thesis is frameworked are the following:

- Study and optimization of rainwater harvesting methods within Sustainable Urban Drainage Systems (SUDS).
- Evaluation and analysis of the quantity and quality of stored rainwater for its later use in urban non-potable applications (park irrigation, street cleaning), recreational uses (golf course irrigation, ponds) and others (fire-fighting).
- Research and development of rainwater storage systems using pervious pavements for its use as a low enthalpy geothermal resource.
- Development of an integrated system that combines rainwater harvesting and storage methods, in sufficient quantity and quality for non-potable uses and as a low-enthalpy geothermal resource for energy evaluation.

The main objective of this thesis is to achieve the first and part of the second objectives of the project VEA, carrying out a study in detail of the infiltration of rainfall through permeable pavements, considered as catchment systems for the source control of runoff with the aim to help in avoiding flooding problems in urban catchments in a sustainable way.

As a consequence of the main objective, the following particular objectives are established:

1. Study of the most used permeable pavements across the world as Sustainable Drainage Systems (SuDS), selection of the most used pervious pavements across the world, and selection of different permeable surfaces and materials liable to be used as sub-base in a permeable pavement for their infiltration capacity study.
2. Development and validation of a laboratory methodology for the analysis of the runoff of permeable surfaces.
3. Development and validation of a laboratory methodology for the analysis of the infiltration capacity of permeable pavements.

4. Development of a laboratory methodology for the analysis of the hydraulic functionality of a permeable pavement and its validation through the study of a new separation layer between the base and sub-base layers of a permeable pavement.
5. Development of a field methodology for the hydraulic diagnosis of permeable pavements with porous surfaces after years of performance.
6. The vehicles parked over a permeable pavement may influence the infiltration capacity of these permeable pavements surface.

The hypotheses proposed as a starting point for this thesis are the following:

1. Several permeable surfaces under different conditions show different behaviours, allowing their hydraulic characterization.
2. The infiltration capacity of a permeable pavement is affected by different variables apart from the scenario of clogging.
3. Possibilities of improvement for the attenuation and control capacity of flooding through permeable pavement exist.
4. It is possible to diagnose unequivocally the clogging state of a permeable pavement at a particular time.
5. Rainfall drops can influence the permeability of a clogged porous mixture surface.

## **2. LITERATURE REVIEW**

The main objective of this literature review is to find out what the most used permeable pavement surfaces are and the impact of the permeable pavement researches over SUDS techniques around the world. And also, to find out a range of extreme rainfall events for a storm duration of 15 minutes and 100 years return period as an example of extreme rainfall events for their practical application on this thesis.

### **2.1 RESEARCHES CARRIED OUT ON SUSTAINABLE URBAN DRAINAGE SYSTEMS (SUDS) AND PERMEABLE PAVEMENTS IN THE WORLD**

With the aim to know the evolution of the international research activity carry out in permeable pavements during the last 30 years, a study about the number of scientific research papers published in journals and Proceedings of the Journal Citation Reports (JCR) was developed. The study was limited to publications in English language as well. These types of publications were selected for being an indicator of quality of the researches. The databases selected for this study were Scopus, Web of Knowledge, Engineering Village and Google Academic due to their wide use by the scientific community of SUDS. Manuals, guides, books and publications outside of JCR journals (included proceedings and contributions to conference and congresses) were not taking into account for this study. Several searches were carried out by using keywords such as pervious pavement, permeable paving and all their possible combinations. 228 references were selected following the criteria explained before. As a result of this study the evolution of the researches carried out in permeable pavements since 1984 up to now are shown in

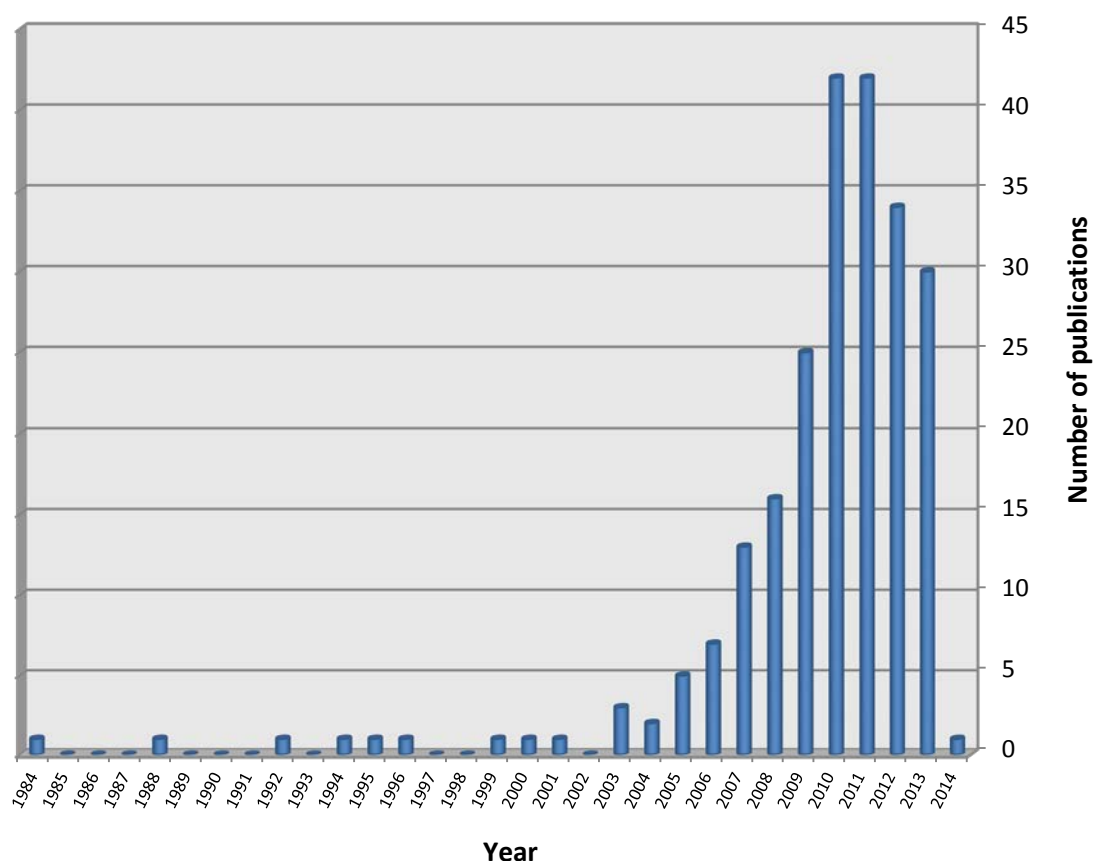


Figure 1. Evolution of the publications since 1984 up to 2014.

United States contributes with 55% of the total publications, followed by the United Kingdom with 7% and Canada with 6%. Countries such as China, Australia and Spain contributed as well with an important percentage between 4 and 5% of the total.

Finally, a brief study about the impact of the permeable pavement techniques on the total of the SUDS researches were developed following the same patterns than in the previous case. The results of this study showed a high percentage between 50 and 60% of the total of SUDS publications during the last 30 years.



## 2.2 EXTREME RAINFALL INTENSITIES

With the aim to determine the most common extreme rainfall intensity ranges in the world, a study of the Intensity-Duration-Frequency (IDF) curves was carried out for several regions of the world. Analyzing the data collected it can be identified a great difference between extreme intensity values between Australia and the majority of the regions in the world. In order to show this difference a storm event of 15 minutes and 100 years return period was taken as an example. Figure 1 shows the values of the city of Brisbane (Australia) with intensities around 2,000 mm/hr that are much higher than those registered in other parts of Europe, Asia, Africa and America whose values are below 400 mm/hr.

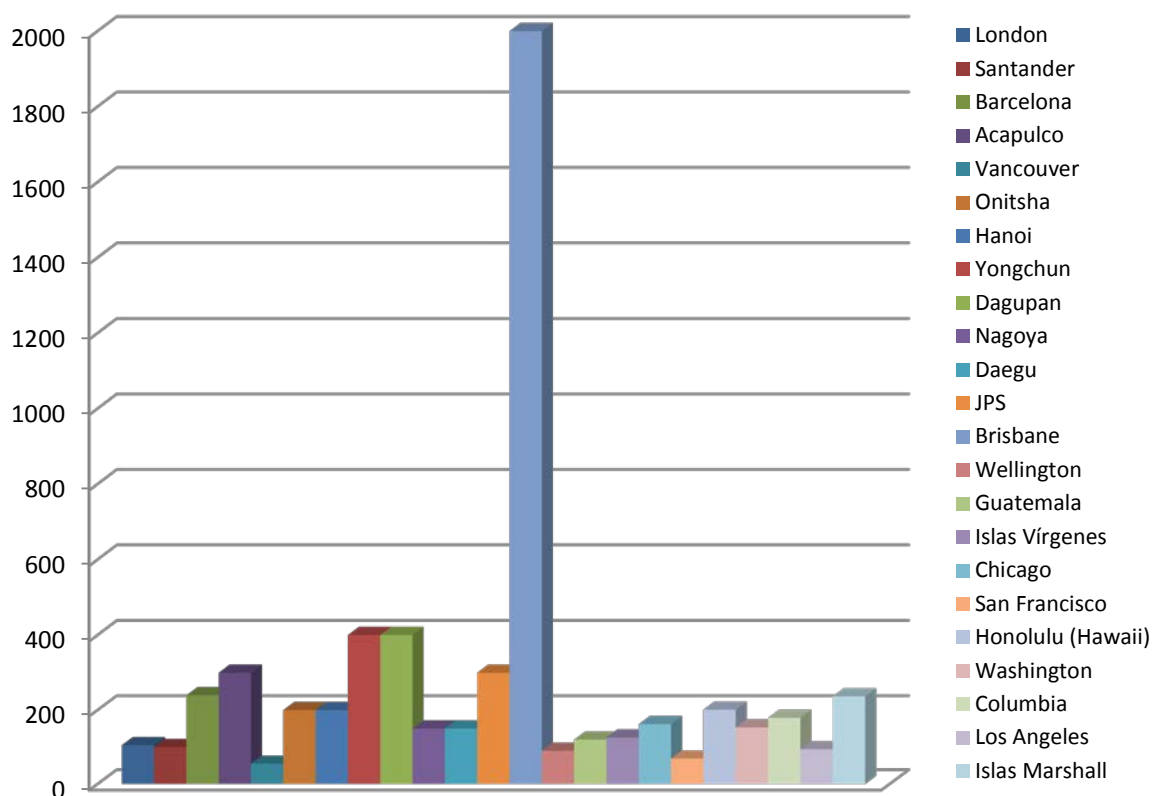


Figure 2. Intensity values in 23 cities across the world for storm events of 15 minutes of duration and 100 years return period.

Brisbane could be considered as an extreme case. Therefore, the rest of the cases were taking into account to determine the range of intensities that are going to be studied along this thesis (intensities such as 50, 100, 200 and 400 mm/hr). Cities such as Vancouver (Canada) and San Francisco (USA) (NOOA 2014) has intensities around 50

mm/hr. Other cities such as Santander (España) (Cué Pérez et al. 2006), London (UK), Wellington (New Zealand) (UNESCO 2008), and Los Angeles (USA) (NOOA 2014) present values around 100 mm/hr. Between this value and 200 mm/hr other cities such as Chicago, Washington, Columbia, Islas Marshall and Honolulu in United States (NOOA 2014), Onitsha (Nigeria) (Oyebande 1982), Hanoi (Vietnam) (UNESCO 2008), Nagoya (Japón) (UNESCO 2008), Daegu (Corea del Sur) (UNESCO 2008) and Guatemala City (Guatemala) (INSIVUMEH 2014) were identified. Cities such as Barcelona (Spain) (Casas Castillo 2005) and Acapulco (Mexico) (Campos-Aranda 2010) were found in a range between 200 and 300 mm/hr. Finally, cities such as Yongchun (China) and Dagupan (Filipinas) (UNESCO 2008) present the highest intensity values around 400 mm/hr.

All these values allow the precise interpretation and a practical analysis of the results obtained in the tests carried out in this research for the analysis of the infiltration behaviour of permeable pavements.

### **3. RESEARCH METHODOLOGY**

#### **3.1 MATERIALS**

Materials used on the permeable pavement sections studied in this thesis were divided into two main groups. On the one side, the selection criteria for the materials used in the laboratory are described, as well as the materials finally used. There will be a brief description of the materials selected previously in this thesis for their use in the “Las Llamas” parking area. In this point, it is important to note that this car park was designed and developed before the start of the thesis. Therefore, no selection criteria from the thesis were applied into the parking area.

##### **3.1.1 SELECTION OF THE SECTIONS OF THE PERMEABLE PAVEMENT USED IN LABORATORY**

Criteria used for the selection of the materials in the different layers of the permeable pavement sections are presented below:

- Level of interest. Permeable surfaces such as porous concrete, concrete blocks with slots and porous asphalt are the most widely studied surfaces across the world, being 95% of the total investigations for the last 30 years.
- Type of most used base aggregate. The most used aggregate used in Cantabria is limestone aggregate without fines in order to achieve the necessary permeability.
- Presence or not of a geotextile layer. The presence of a geotextile has been demonstrated to have a huge influence in the reduction of the pollutants in the runoff, increasing slightly the time that a drop needs to infiltrate through the whole structure of a permeable pavement. Therefore, and having considered all references analyzed previously a decision was made, setting a geotextile layer between the base layer and the sub-base layer. Equally, another material was selected to be used as a complement or even possible substitute of the geotextile layer. Taking into consideration the novelty of this new material called OASIS®, an initial analysis of its hydraulic properties is presented. OASIS® is the main innovative material analyzed in this thesis.
- Most used sub-base material. As well as in the case of the most used aggregates in the case of the base layer, the most used aggregates in the sub-base are the limestone ones. This type of aggregate has been used in

Spain for the construction of permeable pavements with the particle size distribution corresponding to a ZAD-20 type within the Spanish PG-3.

### 3.1.2 PERMEABLE SURFACES

#### 3.1.2.1 Concrete blocks with slots

An Interlocking Concrete Block Pavement (ICBP) made of impervious material that was designed by University of Cantabria for the company Bloques Monserrat (D0502335-1) was used in this thesis (Castro Fresno 2005). This concrete block has a rectangular shape of 20 x 10 cm with 10 cm of thickness. The vertical slots are elliptical and comprise an area of 6 cm<sup>2</sup> in order to allow the infiltration process. Each block weights 4.5 Kg.



Figure 3. Interlocking Concrete Block Pavement of Bloques Monserrat S.L.

#### 3.1.2.2 Porous concrete

The main features of the polymer modified porous concrete used in this research both in the laboratory tests and on-site are the following:

- Compressive strength: 18 and 27 MPA after 7 and 28 days respectively. Those values were obtained according to the European Normatives (hereby synonymous with Standards in English) EN 12390-1 (2012), EN 12390-2 (2009) y EN 12390-3 (2009) by the companies TRIAX and SIEC.
- Percentage of voids: 25% according to the European Normative EN 12697-40 (2013).
- Apparent density: 1.778 Kg/m<sup>3</sup> according to the European Normative EN 12697-40 (2013).

Mix design used in this research can be seen below:

Table 1. Polymer modified porous concrete mix design according to Pindado et al. (1999).

Particle size (Kg)		Spanish cement	Water	Polymer used	Polymers (L)
0-5mm	5-12mm	V-35 (Kg)	(L)		
104	1456	260	40	Pure acrylic polymer	40

Other porous concrete known as ECOCRETO® was used in some of the laboratory experiments. This material has the following technical features:

- Compressive strength after 28 days: 150 kg/cm<sup>2</sup>.
- Flexural strength: 25 kg/cm<sup>2</sup>.
- Apparent density: 1.600-1.800 Kg/m<sup>3</sup>.

Table 2. Porous concrete (ECOCRETO®) mix design (ECOCRETO 2011).

Sand (Kg)	Stone of ¾" (Kg)	Cement (Kg)	Water (L)	ECOCRETO® (additive)
50	1.15	240	70	8.5

### 3.1.2.3 Porous asphalt

The porous asphalt used in this research was a Spanish PA-16 (Ministerio de Fomento. Dirección General de Carreteras 2011) and was supplied by the company SENOR. Its main characteristics are presented below:

- Apparent density: 2.050 Kg/m<sup>3</sup> according to the European Normative EN 12697-40 (2013).
- Percentage of voids: 23% according to the European Normative EN 12697-40 (2013).

Table 3. Particle size distribution of the PA-16 porous asphalt (Ministerio de Fomento. Dirección General de Carreteras 2011).

<b>Spanish UNE sieves (mm)</b>	<b>0.063</b>	<b>0.500</b>	<b>2.0</b>	<b>4.0</b>	<b>8.0</b>	<b>16.0</b>	<b>22.4</b>
<b>Established ranges in the Spanish PG-3 (% in mass)</b>	3-6	5-12	10-17	13-27	40-60	90-100	100
<b>Samples made in laboratory (% in mass)</b>	4.3	8.0	13.0	19.0	50.0	94.0	100.0

Particle size distribution study was developed by the company SENOR according to the European Normative UNE-EN 933-1 (2012).

### 3.1.3 BASE LAYER

A 50 mm thick base layer of limestone aggregate with a particle size 4-6.3 mm is used in this research with the following features:

- Apparent density: 1.354 Kg/m<sup>3</sup>.
- Percentage of voids: 50%.

### 3.1.4 SEPARATION AND FILTRATION LAYER

#### 3.1.4.1 Geotextile

A polyester nonwoven geotextile (DANOFELT PY 150) was used as the separation and filtration layer with the characteristics shown below.

Table 4. Geotextile DANOFELT PY 150 features (DANOSA 2013).

Average mass (g/m <sup>2</sup> ) UNE-EN 965	Permeability (m/s) UNE-EN ISO 11058	Longitudinal tensile strength (KN/m) UNE-EN ISO 10319	Transversal tensile strength (KN/m) UNE-EN ISO 10319	Thickness under 2 kPa pressure (mm) UNE-EN 964	Opening size (μm) UNE-EN ISO 12956
150 (+10%; -15%)	0,04468; -0,005	1,2; -0,3	1,2; -0,3	1,90 ± 0,20	100, ± 20

The geotextile has two main functions: filtration of water and separation of the base and sub-base layers. This geotextile has also demonstrated in previous research (Rodriguez Hernandez 2008) to have suitable features to be used within the permeable pavement structure due to its high permeability (Table 3) amongst other characteristics.

#### 3.1.4.2 OASIS®

OASIS® with the patent number WO2006077421A1 is a new product that was included in the study of the permeable pavement hydraulic performance. As a description of the material in the patent, OASIS® is open celled phenolic foam material such as foamed phenol formaldehyde resin. This material not only absorbs the water but also retains microorganisms to break down pollutants. This water storage capacity is expected to absorb between 40 and 50 ml of water per each gram of OASIS®. In this research, 1.3 and 2.0 cm thick of material were used.

#### 3.1.5 SUB-BASE LAYER

Limestone aggregates were used as an aggregate layer in the sub-base. The particle size distribution of these aggregates is presented in Table 4 accomplishing with the ranges required in the Spanish PG-3 for ZAD-20 (Bustos and Pérez 2007).

Table 5. Particle size distribution of the limestone aggregates used as sub-base in permeable pavements accomplishing with the ranges required in the Spanish PG-3 for ZAD-20 (Bustos and Pérez 2007).

Limestone aggregates	Spanish sieves UNE (mm)								
	40	25	20	8	4	2	0,5	0,25	0,063
<b>Cumulative range established for the Spanish ZAD-20 (PG-3) (%)</b>	—	100	65-100	30-58	14-37	0-15	0-6	0-4	0-2
<b>Passing (%)</b>	—	100	65	30	14	—	—	—	—

In the case of the study carried out in the UK at Coventry University, the sub-base was a limestone aggregate with sizes between 10 and 63 mm.



### 3.1.6 PERMEABLE PAVEMENT SECTIONS USED IN THE FIELD EXPERIMENTS

All sections analyzed in the field experiments in “Las Llamas” parking area are presented below. It is important to note that the selection of all materials and sections in this experimental car park were the object of a previous project carried out by Gómez-Ullate (2011).

Table 6. Characteristics and thickness of the permeable pavement sections analyzed in “Las Llamas” experimental parking area (Gómez-Ullate 2011).

Layer	Type of permeable surface	
	Porous asphalt PA-12 according to Bustos and Pérez 2007	Polymer modified porous concrete according to Pindado et al. 1999
Permeable surface	80 mm	80 mm
Base	5 cm of limestone aggregate with sizes between 4 – 6.3 mm.	
Geotextile	Polyfelt TS30 (4 bays)	Polyfelt TS30 (4 bays)
	Danofelt PY150 (4 bays)	Danofelt PY150 (4 bays)
	Without geotextile (1 bay)	Without geotextile (1 bay)
Sub-base	Clean limestone (350-370 mm)	

The reason for dividing the table in function of the permeable surfaces used was due to the layer that determined the drainage values is the permeable surface, and also, the LCS permeameter is a device for measuring the permeability especially designed for the porous mixture surfaces according to the European Normative EN 12697-40 (2013).

Both the geotextile and the base and sub-base layers used in the parking area did not have influence in the field tests, because LCS permeameter only measures the drainage capacity of the surface layer.

Finally, it is important to highlight that the porous asphalt used in the

experimental parking area was slightly different than that used in the laboratory. This was due to the fact that the regulations in Spain regarding porous mixtures changed between the design and construction of the experimental parking area and the beginning of this research. As a consequence, the porous asphalt used in the car park was a Spanish PA-12 (Bustos and Pérez 2007) whilst a Spanish PA-16 porous mixture was used in the laboratory (Ministerio de Fomento 2011). This allowed a comparison between both studies undertaken in the laboratory and the field.

### 3.2 TEST OF THE ASSESSMENT OF THE INFILTRATION CAPACITY OF A PERMEABLE PAVEMENT IN THE LABORATORY

#### 3.2.1 CANTABRIAN FIXED INFILTRMETER (CFI)

The laboratory device used for this test is the Cantabrian Fixed Infiltrometer (CFI) designed by Rodriguez Hernandez (2008) in University of Cantabria based on a previous laboratory device designed by Davies et al. (2002) in Coventry University. For this research, the author incorporated the following modifications in the CFI (Figure 2):

- **Flowmeters:** Use of two flowmeters to control both direct rainfall intensity and runoff flow in real time and to maintain the same flows during the tests.
- **Runoff simulator location:** Improvement in the simulation of the runoff by placing the runoff simulator over a methacrylate structure around the sample of the permeable surface analyzed.
- **Measurement of the sub-superficial runoff flow.** The frontal side of the permeable surface wood frame was eliminated, replacing wood material for steel mesh and boring the geotextile to allow the possible passage of the water through it.

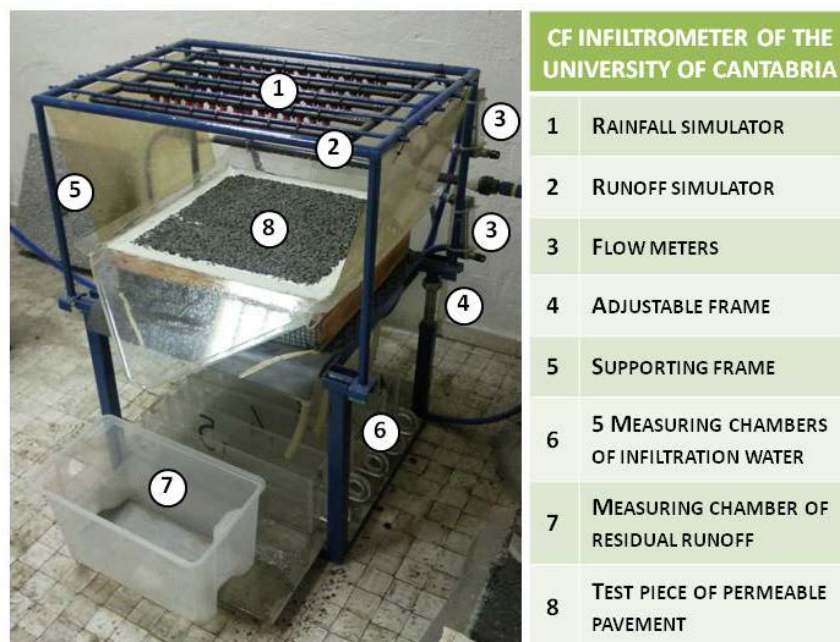


Figure 4. Scheme of the parts of the improved Cantabrian Fixed Infiltrometer.

The elements of the Cantabrian Fixed Infiltrometer can be seen in Figure 2 and are described below:

- **Rainfall Simulator.** This part of the CFI simulates direct rainfall over the permeable surface. It is placed at the top of the laboratory device, 50 cm above the test surface. It is formed by 5 lines of 15 bubblers each. Their droplet diameter is 3.5 mm, corresponding with a theoretical kinetic energy of  $5.6 \cdot 10^{-4}$  J (Rodriguez-Hernandez et al., 2012). Each drop allows simulating flows in a range between 0 up to 40 L/hr.
- **Runoff Simulator.** This simulates the runoff from impervious zones of the parking lot. The runoff simulator is a perforated pipe located over the methacrylate structure around the permeable surface test piece.
- **Flowmeters.** Two flow meters are used to measure the flow during the test in each simulator, maintaining the rainfall intensity established for the test. The units of this measurement are in L/hr.
- **Adjustable Frame.** This is the metallic structure that supports the CFI weight, contains the test piece and the five chambers to measure infiltration, enabling the slope control.
- **Supporting frame.** It is the metallic superstructure where the direct runoff simulator is placed.
- **Measuring chambers.** There are three types of measuring chambers: five chambers to collect the infiltration water, one to collect the sub-superficial flow water if any, and another one to collect the residual runoff.
- **Test piece.** Square test pieces of permeable pavements with 50 x 50 cm<sup>2</sup> of surface area and 10 cm of thickness are placed in the methacrylate frame.

This improved laboratory device (Figure 2) allows assessing any type of permeable pavement specimens of 0.25 m<sup>2</sup> (0.5 m large and 0.5 m width) of surface under rainfall intensities from 10 mm/hr up to 150 mm/hr for any storm duration and slopes in a range between 0 and 10%.

Test pieces were formed by three main layers whose characteristics were described before in the sub-chapter dedicated to materials used in the research:

- A top layer of permeable surface. Three different permeable surfaces were studied:

- Interlocking Concrete Block Pavement (ICBP) as well known as impervious concrete blocks with slots.
  - Porous concrete. A Polymer-Modified Porous Concrete (PMPC) was used for this study.
  - Porous asphalt. A Spanish PA-16 porous mixture was used.
- A base layer 50 mm thick of limestone aggregate with a particle size between 4 and 6.3 mm.
- A bottom layer of polyester nonwoven geotextile (DANOFELT PY 150).

### 3.2.2 TEST DESCRIPTION

The main objective of these tests was the study of the infiltration rates and the residual runoff in a permeable pavement under the conditions that can affect a permeable pavement during its operational life. A comparison between the three different permeable pavement sections selected for this study under the same extreme rainfall intensity was carried out. Three different clogging scenarios (Figure 3) were analyzed for all permeable surfaces. These scenarios are described below:

- **Newly built surface.** This level of clogging represents the infiltration behaviour of a permeable surface newly built under ideal conditions of service without any type of sediments that could clog the surface.
- **Clogged surface.** This second scenario represents those conditions after a huge addition of sediments on the surface and the instant consequences that this fact could have on the infiltration behaviour of the permeable surfaces.
- **Clogged surface with maintenance.** Finally, a third level of clogging was added. This last level was to try and analyzed the influence that maintenance operations usually carried out in Spain by using mechanical sweepers can have on the possible recovering of the infiltration capacity of a permeable surface and on its infiltration rates.

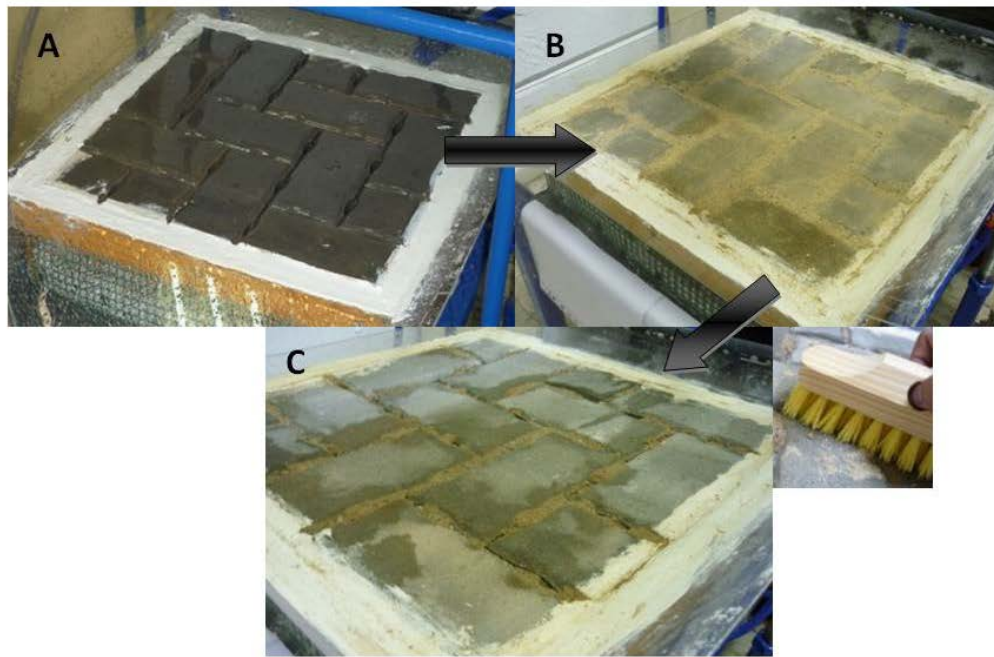


Figure 5. Scenarios of clogging: (A) Newly built surface; (B) Clogged surface; and (C) Clogged surface with maintenance.

All tests were undertaken under the same laboratory conditions that are shown below (Sañudo-Fontaneda et al. (2013):

- Rainfall intensity: 60 mm/hr. This intensity corresponds with 50 years return period rainfall for storm duration of 30 minutes in Santander (Spain) (Cué Pérez et al., 2006).
- Temperature range: 16-20°C.
- Humidity: 70-80%.

In spite of the fact that the duration of the test was 30 minutes, the test was divided into two main stages presented below:

- Steady-state stage. It is the first stage in which the system achieves the steady-state of water flow inside the permeable pavement. A period of 10 minutes was necessary according to Davies et al. (2002) and Rodriguez-Hernandez et al. (2008). This time enables the wetting of the surface layer, the base layer of aggregates and the geotextile layer as well.
- Measuring stage. The remaining time of the test (20 minutes) corresponded with the measurement stage in which the amount of water was measured for all collection chambers both for infiltration and residual runoff.

Two main objectives arise in this test as was described before. Firstly, the achievement of regression linear models that allow in depth analysis of the infiltration behaviour of a permeable pavement. This is based on the results of the infiltration rates from the tests for each permeable pavement under each clogging scenario. Secondly, the analysis of the residual runoff of a permeable pavement under all of the clogging scenarios improves understanding of the appearance of the runoff in a permeable pavement and how the sediments affect the hydraulic behaviour. Both objectives help in addressing the particular objective of the thesis regarding the development and laboratory validation for the analysis of the infiltration capacity of permeable pavements.

The variables included in the regression linear models were chosen after a study of the variables that may have an influence on the infiltration rates. Then, the following topographical variables were included in the study:

- **Runoff surface length (cm)-(R<sub>SL</sub>)**. This is the first independent variable studied and corresponds with the distance measured from the top part of the test piece (50 cm maximum). Five infiltration chambers are used to collect water that infiltrates through the permeable pavement section in the CFI every 10 cm along the test piece.
- **Surface slope (%)-(S<sub>S</sub>)**. This second variable represents the slope of the permeable pavement.
- **Cumulative infiltration rate (%)-(C<sub>IR</sub>)**. Finally, the dependent variable of this study corresponding with the cumulative percentage of infiltration every 10 cm.

For the study of the residual runoff, the variables analyzed were the following:

- **Surface slope (%)-(S<sub>S</sub>)**. Exactly the same variable used for the regression linear models.
- **Residual runoff (%)-(R<sub>R</sub>)**. This variable represents the values of the residual runoff registered in every test carried out by using the CFI under all clogging scenarios and under all surface slopes.

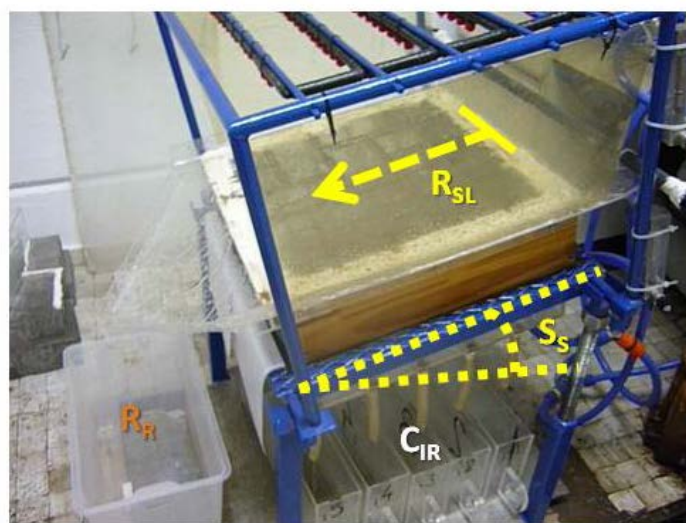


Figure 6. Variables used in the study with the CFI.

All tests were performed with three specimens per permeable surface, being tested each one of them under the three different clogging scenarios. Limestone silt with 14% of organic matter was used to achieve the clogging scenarios (clogged surface and clogged surface with maintenance). Previous studies carried out by Davies et al. (2002) and Rodriguez-Hernandez et al. (2008) pointed out the reduction in the infiltration capacity in permeable pavements due to the use of organic matter. In this research, sawdust was used to simulate organic matter in the sediments. Particle size distribution of the sediments for all permeable surfaces can be seen in Figure 4.



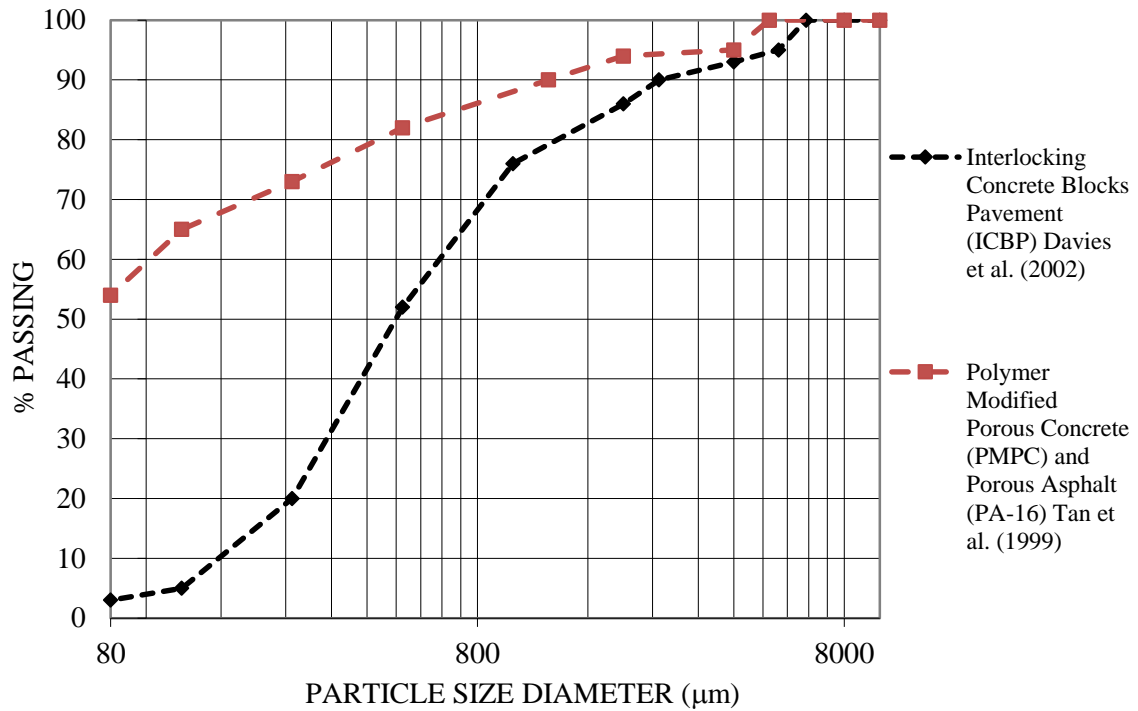


Figure 7. Particle size distribution of the sediments used to clog the permeable surfaces.

The amount of sediments necessary to clog all permeable surfaces was  $3,900 \text{ g/m}^2$  in the case of the concrete blocks and  $2,000 \text{ g/m}^2$  in the case of the porous mixture surfaces (porous concrete and porous asphalt). The sawdust used to simulate the organic material in the sediments was added in the particle size diameter ranges of  $250\text{--}500 \mu\text{m}$  and  $< 80 \mu\text{m}$  in the case of the concrete blocks, whilst in the case of the porous mixtures surfaces was added in the range of fines up to  $500 \mu\text{m}$ . The sediments were applied in the same way independently of the surface. In all cases, the sediments were introduced into the gaps of the concrete blocks and the voids of the porous mixtures and then slightly hand-compacted. Finally, the remaining clogging scenario (clogged surface with maintenance operations) was simulated by a light brushing, trying to take away part of the sediments trapped in the top portion of the permeable surfaces analyzed. Other maintenance methods exist that are more successful than the one used in this research. Nevertheless, this method was chosen to simulate the easiest way to model the maintenance carried out by the sweeping machines used to clean urban surfaces. The final objective was to define the possible recovery of the infiltration capacity on permeable surfaces to develop practices that require as little maintenance as possible.

As a final consideration on these tests, it is important to highlight the hydraulic

phenomena that govern the infiltration behaviour of a permeable pavement. Initially, the first remarkable point is that the great permeability of all layers that are part of a permeable pavement section avoids saturation of the test specimens. The base layer of aggregates and both porous mixtures surfaces (porous concrete and porous asphalt) are porous media, whilst the permeable surface of concrete blocks is not a porous media but has a high volume of slots where the water can infiltrate in high flow rates. Therefore, both the aggregates layer and the porous mixture surface are porous media under non-saturated conditions during the entire duration of the tests. In this case, the Darcy's Law can be applied based on the assumption that steady-state flow through porous media is governed by the Navier-Stokes equations (Sansalone et al. 2008; Charbeneu et al. 2010; Rodriguez-Hernandez et al. 2012). As a result of this the hydraulic phenomena that take place in the permeable pavement section can be explained by means the hydraulic characteristics of the layers. For the specific case of a permeable surface made of concrete blocks with slots (ICBP) the volume of slots are  $60 \text{ cm}^3$  per block. Consequently, a volume greater than  $60 \text{ cm}^3$  is required to generate runoff under a newly built scenario of clogging. The rainfall intensity necessary to achieve this volume is  $432 \text{ mm/hr}$ . Having considered that the CFI has an upper limit of  $150 \text{ mm/hr}$ , the physical process will be always the same in all cases and the most influential variables are assumed to be the topographical ones selected in this study due to this reasoning.

As a complement to complete the analysis of the infiltration capacity of permeable pavements made of porous mixtures surfaces, the infiltration capacity of the geotextile used in their structure was analyzed. The objective was to briefly analyze the differences between the newly built surface scenario before carrying out the tests and after undertaking all the tests (after the simulation of the clogging scenarios) and retire the geotextile from the test piece. With this aim, the following tests were undertaken:

- Water permeability normal to the plane according to UNE-EN ISO 11058 (2010).
- Determination of mass per unit area according to UNE-EN ISO 9864 (2005).

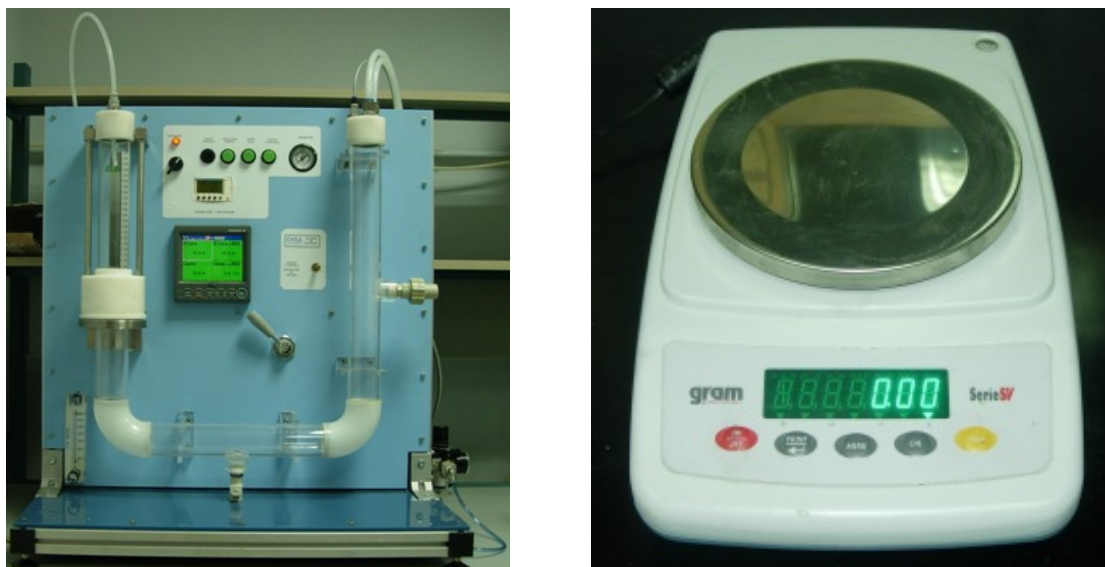


Figure 8. (Left) Water permeability normal to the plane test and (right) determination of mass per unit area test.

### 3.3 TEST OF PERMEABLE PAVEMENT HYDRAULIC BEHAVIOUR IN THE LABORATORY

#### 3.3.1 RAINFALL SIMULATOR

A new rainfall simulator called Portable Laboratory Rainmaker (PLR) was especially designed and developed in Coventry University for this research. It was designed with the aim to simulate a wide range of rainfall intensities. This device is divided into two main elements as can be seen in Figure 6: rainfall chamber and perforated plate.

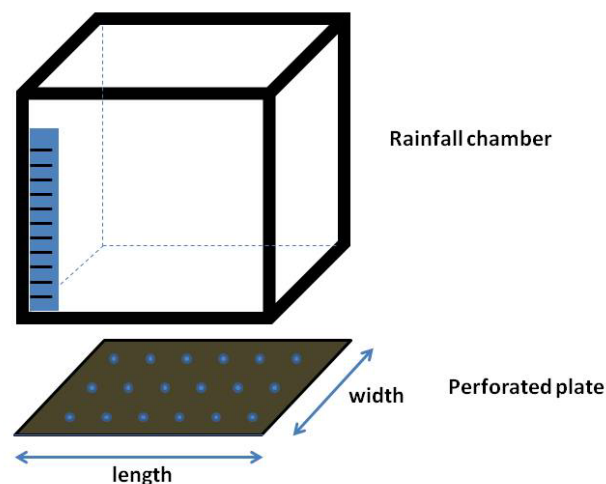


Figure 9. Elements of the Portable Laboratory Rainmaker (PLR).

A ruler was included in the rainfall chamber to measure the head of water in this chamber. This chamber also has two apertures, one on the top to introduce the water, and another one on the bottom where the perforated plate is located and joined to the rainfall chamber by using sealant around the perimeter of the joint. The perforated plate has 4 lines with 4 adjustable drippers each line for a total of 16 drippers. Drippers' characteristics are presented below:

- Drop diameter: 3.5 mm.
- Range of adjustable flow: 0-40 L/hr.

Once the drippers were placed, the final configuration of the PLR is shown as follow in Figure 7.

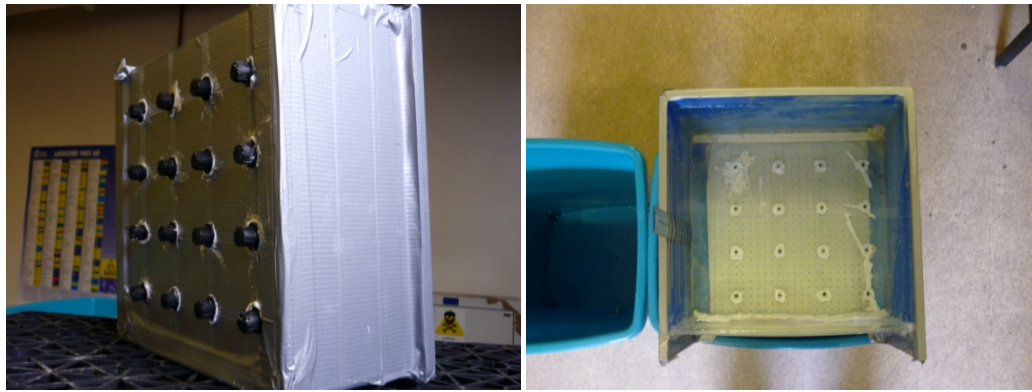


Figure 10. Final configuration of the PLR.

A calibration procedure was developed to validate the use of the PLR. This calibration consisted of the measurement of the volume of water obtained during the simulation for each head of water in the rainfall chamber. As a consequence one rainfall intensity is associated to each head of water, making the simulation of different rainfall intensities possible. A graduated vessel and two bins were used to calibrate the device obtaining volumes of water every minute as can be seen in Figure 8.



Figure 11. (Left) Vessel to measure the volumes of water every minute and (right) bins collecting water flow every minute.

The range of intensities that can be simulated with this laboratory device is between 50 and 450 mm/hr as a result of the calibrations shown in Figure 9.

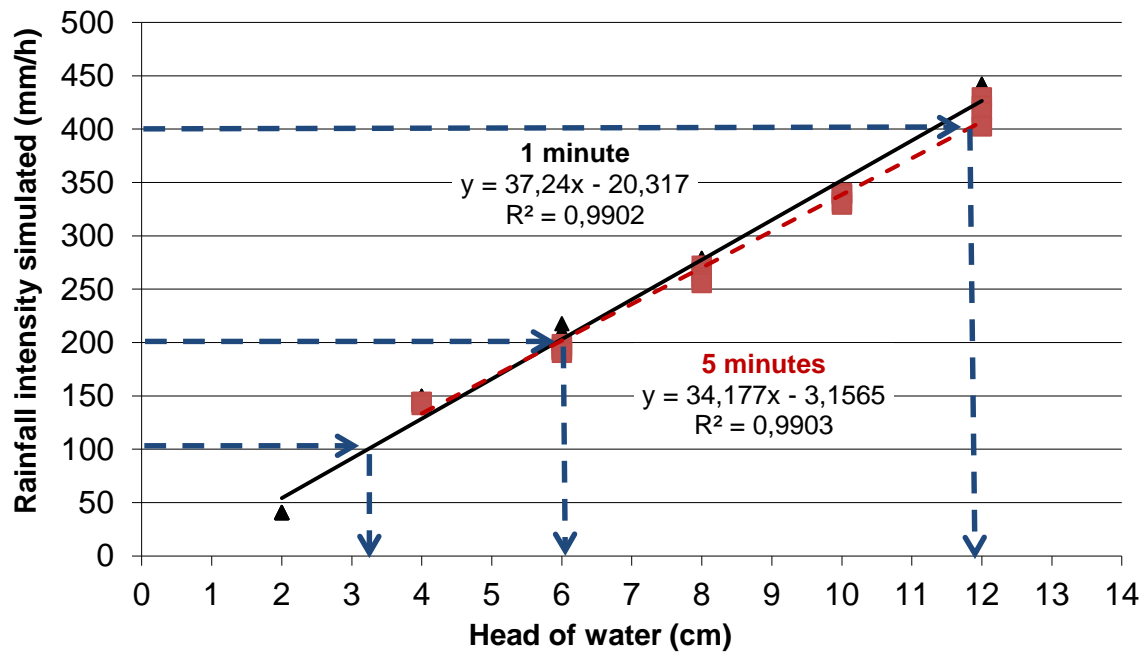


Figure 12. Calibration of the PLR device for 1 and 5 minutes respectively.

However, it was observed during the calibration procedure that the behaviour of this device was inconsistent in its precision when simulating storm durations above 15 minutes. This lack of precision was measured and shown to give up to a 20% difference in the rainfall intensities simulated. Therefore, this device was not finally used to simulate rainfall events. In order to assure as much precision as possible in the rainfall simulation a specific volume of water was added every minute, distributing it over the entire surface of the permeable pavement rig using a graduated vessel.

### 3.3.2 TEST DESCRIPTION

The objective of these tests was the analysis of the infiltration behaviour of a section of permeable pavement in the laboratory. This was achieved through the determination of the time that a drop needs to infiltrate through the entire section of the pavement depending in the inclusion or not of an OASIS® layer. With this aim, the tests were carried out on three different types of sections (Table 5): standard permeable pavement section named CONTROL without the OASIS® layer, standard permeable pavement section with an OASIS® layer of 1.3 cm thick within its structure, and finally, standard permeable pavement section with an OASIS® layer of 2.0 cm thick within its

structure.

Table 7. Sections of permeable pavement studied.

Section	Layer	Material	Thickness (cm)
<b>CONTROL</b>	Permeable surface	Aquaflow concrete blocks	10
	Base	Limestone aggregate 4-6.3 mm	5
	Separation and filter	No	—
	Sub-base	Limestone aggregate 10-63 mm	35
<b>OASIS 1.3</b>	Permeable surface	Aquaflow concrete blocks	10
	Base	Limestone aggregate 4-6.3 mm	5
	Separation and filter	OASIS®	1.3
	Sub-base	Limestone aggregate 10-63 mm	35
<b>OASIS 2.0</b>	Permeable surface	Aquaflow concrete blocks	10
	Base	Limestone aggregate 4-6.3 mm	5
	Separation and filter	OASIS®	2
	Sub-base	Limestone aggregate 10-63 mm	35

A total of 9 bins (three for each type of section) were used to simulate the structures shown before in Table 5. A hole was dug at the bottom of each bin in order to measure the volume of water infiltrating through the entire section of permeable pavement (Figure 10).



Figure 13. (Left) Hole with a pipe at the bottom of the bin to measure the volume of water infiltrated and (right) scheme of the 9 bins used to simulate the three sections of permeable pavements.

With these three different sections it is possible to quantify the hydraulic advantages that the inclusion of the OASIS® layer can provide to the system in contrast to the usual or standard design of some British landscape companies (permeable surface, base and sub-base layer of aggregates and/or a geotextile as a separation and filtration layer between the aggregate layers) as a main hypothesis of the test. Among the main advantages that are expected to be obtained with the use of the OASIS® layer in these tests include the following:

- High storage capacity.
- Higher control and delay of the runoff peak-flow than a standard section.

Three rainfall intensities of 100, 200 and 400 mm/hr were simulated to cover the spectrum of extreme rainfall events in the majority of the world for a storm event of 15 minutes and 100 years return period. Moreover, all tests were undertaken under the same laboratory conditions:

- Temperature range: 14-18°C.
- Humidity: 60-70%.

Every test is divided into three main stages:

- ❖ **Initial stage.** It starts with the addition of water on the rigs each minute, adding 75, 150 and 300 ml/minute in order to simulate 100, 200 and 400 mm/hr of rainfall intensity respectively. This stage is divided into two sub-stages as well:



- Concentration sub-stage. This sub-stage consists of the time that a rainfall drop needs to infiltrate through the entire section of the permeable pavement (concentration time) and become outflow in the bottom pipe (Figure 10).
- Intermediate sub-stage. This sub-stage is defined as the time that the water flow inside the section of the permeable pavement took to achieve the steady-state condition counting from the beginning of the outflow in the bottom pipe. The infiltration rates are measured by taking the volume of water in the outflow of the bottom pipe every minute during this sub-stage.
- ❖ **Steady-state stage**. This stage begins when the flow of water inside the section of the permeable pavement reaches a constant infiltration rate that means the steady-state condition of the flow. This stage points out the value of the peak-flow in the effluent due to the rainfall intensity simulated in the test and the time that each system takes to achieve the peak-flow depending on their structures. The infiltration rates are measured in this stage as well as in the intermediate sub-stage.
- ❖ **Discharge stage**. This final stage is measured since the end of the rainfall event up to the measurable outflow (1 ml/minute) in the bottom pipe under the conditions of the tests.

In the case of the CONTROL sections, the duration of the rainfall event simulated was in all cases 15 minutes due to the fact that all stages of the test were reached before the end of this time and being a reference for the comparison with the hydraulic modifications introduced by the OASIS® layer in the hydraulic behaviour of the system. In those cases in which the OASIS was used (OASIS 1.3 and OASIS 2.0) the duration of the tests was between 30 and 60 minutes. This fact allowed the interpretation of the duration of the tests with OASIS® as the number of rainfall events of 15 minutes that will be necessary to reach each stage in comparison with CONTROL sections.

In order to analyze the infiltration behaviour of the new section of permeable pavement proposed in this thesis and the hydraulic advantages provided for this product, the following variables were selected:

Independent variables:

- **Rainfall intensity.** This variable is associated with the water flow added to every section studied. 75, 150 and 300 ml/minute volume was added, simulating rainfall intensities of 100, 200 and 400 mm/hr respectively.
- **Time.** Measurement of the time during the test to delimit all stages and sub-stages afterwards.

Dependent variables:

- **Infiltration rates.** Measurement of the outflow rates per minute at the bottom pipe.

Other variables:

- **Volume of water used.** This volume of water depends on the conditions of each permeable pavement section and the time that each section needs to reach the steady-state stage in the effluent at the bottom pipe.
- **Number of rainfall events.** Number of rainfall events necessary to reach every stage in the test depending on the rainfall intensity and the permeable pavement section.
- **Volume of water stored in the OASIS® layer.** Volume of water that the OASIS® is able to retain within its structure.
- **Outflow volume.** Volume of water that infiltrates through the entire section of permeable pavement and flow out the bins through the pipe.
- **Time necessary to hydraulically saturate the OASIS®.** This is the time that the structure of the OASIS® needs to become completely saturated by water. This time was found when the permeable pavement sections with OASIS® inside reached the peak-flow, and therefore, the steady-state stage of the infiltration flow. This time determines the extra attenuation of the flow provided by the use of the OASIS® layer in comparison with the CONTROL section.

The theoretical explanation of the hydraulic process that took place in the assessments of the infiltration capacity of a permeable pavement in the laboratory can be compared experimentally with these tests.

### 3.4 TESTING OF THE DRAINAGE FUNCTION ASSESSMENT OF POROUS MIXTURES SURFACES OF POROUS CONCRETE AND POROUS ASPHALT IN THE LABORATORY AND THE FIELD

#### 3.4.1 LCS PERMEAMETER

The LCS permeameter was selected for the laboratory and field characterization of permeable surfaces of porous mixtures (concrete and asphalt). A comparison between both surfaces in the laboratory and in the field was proposed.

The LCS allows measurement of the capacity of the drainage of a permeable surface depending on the time that this surface needs to infiltrate a known determined column of water (25 cm) (Figure 11). These tests were developed according to the Spanish Normative NLT-327/00 (2000) and the European Normative UNE-EN 12697-40 (2013) which describe a method to obtain the relative hydraulic conductivity in-situ.



Figure 14. LCS permeameter.

This test is an internationally recognized method to check the drainage function of a pavement during its operational life in order to validate its hydraulic performance as a superficial layer. The method consists of fulfilling the cylinder with water up to the marks with clean water, and then, removes the bottom cover and releases the water column starting the infiltration process. The time that this column of water needs to infiltrate is the hydraulic conductivity of the permeable surface also known as in-situ permeability.

This test was especially designed for the study of hot porous asphalt mixtures. Nevertheless a previous research carried out by Fernandez-Barrera et al. (2008) on the application of this method on porous concrete surfaces has demonstrated that it is possible to use this method as a measurement of the hydraulic conductivity in porous concrete surfaces.

### **3.4.2 TESTS DESCRIPTION**

The tests were carried out in the laboratory and in the field with slight differences regarding the scheme as will be explained in the next section.

#### **3.4.2.1 Laboratory tests**

Firstly, the objective of the laboratory tests was to determine the reduction in the infiltration capacity of porous mixture surfaces of porous concrete and porous asphalt. Both porous mixture surfaces (concrete and asphalt) were compared before clogging, representing a newly built surface, and after the two scenarios of clogging (clogged surface and clogged surface with maintenance). That means that the tests were carried out on the same surfaces used in the infiltration capacity studies undertaken by using the CFI.

The tests methodology was different depending upon the clogging scenario. Thus, in the case of a newly built surface three measurements were taken in the same central point of both sides of the porous mixture sample used in the CFI (50 cm x 50 cm) (6 measurements per each sample for a total of 18 measurements for the three test pieces). In the case of the clogged scenario with maintenance, 24 points of measurement were selected in the side of the sample most affected by the addition of sediments with three repetitions per each one. These measurements were divided into two main zones with 12 measurements per each one. The drops take away part of the sediments that clog the surface in the zone where the drops hit the surface during the CFI test. Hence, two different zones can be observed (Figure 12); a clogged zone where the drops did not touch the surface and a less clogged zone where the drops contacted the surface. Therefore, this test can provide the results on the permeability reduction over both porous surfaces and the possible impact of the drops in producing different zones of permeability in the same test piece.



Figure 15. Scheme of the two main zones of study: clogged zone where the drops did not touch the surface and less clogged zone where the drops touched the surface and take away the sediments.

#### 3.4.2.2 Field tests

For field experiments the LCS permeameter was used on those permeable pavement sections with porous mixture surfaces of porous concrete and porous asphalt in “Las Llamas” experimental parking area. It is important to remember that there is no data about the initial permeability of this parking area when built because this thesis did not start until some years later. In this case and with the objective to compare results obtained after 5 years of permeable pavement performance in the field, permeability tests were carried out on porous mixtures samples newly built to check the ideal permeability obtained in this type of surfaces. With these tests it was possible to diagnose the drainage functionality, and therefore the infiltration capacity of a porous mixture surface after 5 years of performance. All car park bays tested (a total of 18 bays, 9 per each porous mixture surface) are shown below in Figure 13.



Figure 16. Scheme of the 18 car park bays analyzed in this study, 9 of porous concrete on the left side and 9 of porous asphalt on the right side.

Each car park bay was divided into 9 different zones of measurement depending on the contact zones of a vehicle parked over them, considering the hypothesis of the influence of the cars parked on the places on the infiltration capacity of the porous mixtures surfaces. These zones present the following characteristics (Figure 14):

- **Zone 1.** Static contact between the left front wheel of a vehicle and the permeable surface.
- **Zone 2.** Intermediate zone between contact zones between front wheels and the permeable surface.
- **Zone 3.** Static contact between the right front wheel of the vehicle and the permeable surface.
- **Zone 4.** Intermediate zone between the contact zones between front and rear wheels of the vehicle and the permeable surface.
- **Zone 5.** Central zone of the car park bay.
- **Zone 6.** Intermediate zone between the contact zones between right front and rear wheels of the vehicle and the permeable surface.
- **Zone 7.** Static contact between left rear wheel of the vehicle and the permeable surface.
- **Zone 8.** Intermediate zone between the contact zones between rear wheels of the vehicle and the permeable surface.
- **Zone 9.** Static contact between the right rear wheel of the vehicle and the permeable surface.

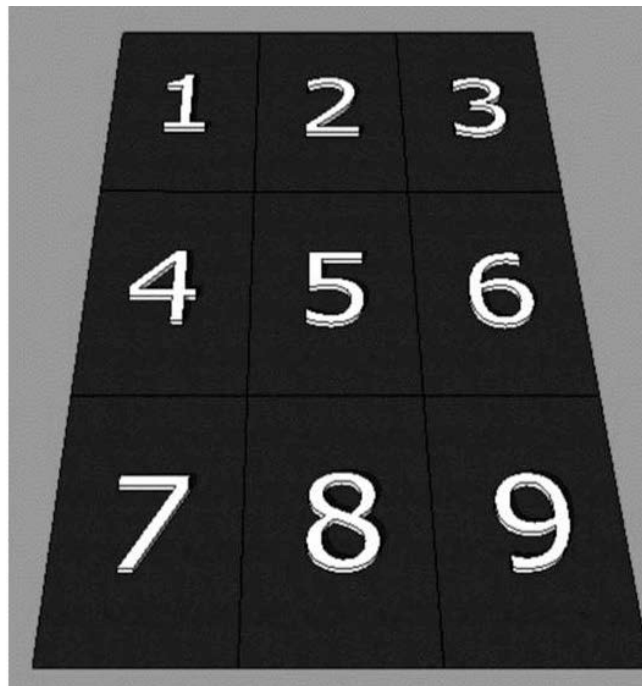


Figure 17. Zones of measurement within the car park bay.

A score for every zone is given depending on the equivalent permeability obtained with the LCS permeameter according to the criteria pointed out by Pérez and Calzada (1990) for porous mixtures surfaces (Table 6).

Table 8. Score to define the drainage functionality performance of a porous mixtures surface when using the LCS permeameter.

<b>Time</b> (seconds)	<b>Permeability</b> (m/s)	<b>Score</b>
< 50	0.0050	Newly built
50 - 100	0.0025	High
100 - 200	0.0013 – 0.0025	Medium
> 200	0.0013	Poor

In the case of the newly built surface score within the criteria, Pérez y Calzada (1990) mainly refers to a measured time with the LCS permeameter between 25 and 35 seconds.

## 4. RESULTS AND DISCUSSIONS

### 4.1 TEST OF THE ASSESSMENT OF THE INFILTRATION CAPACITY OF A PERMEABLE PAVEMENT IN THE LABORATORY

The following information is presented as a brief reminder of the methodology used in these tests. Three types of permeable pavement were tested by using the CFI (interlocking concrete blocks pavement, polymer-modified porous concrete and PA-16 porous asphalt) under three scenarios of clogging (newly built surface, clogged surface and clogged surface with maintenance) and 5 different surface slopes (0, 3, 5, 7 and 10%). The same aggregate was used as base layer and the same geotextile was used as a separation and filtration layer in all cases. Three samples per each surface were built in all cases, except in the case of the porous concrete in which case 5 samples were built. Consequently, 155 tests were carried out in total as follows:

- **Interlocking Concrete Blocks Pavement (ICBP)** or impervious concrete blocks with slots. 45 tests were undertaken on this surface, using 3 samples and 3 clogging scenarios with 5 different surface slopes.
- **Polymer-Modified Porous Concrete (PMPC)**. 65 tests were carried out on this surface. 45 of these tests were undertaken in the same way than the previous surface of ICBP, plus other 20 extra tests that was necessary to treat correctly the results to achieve all statistical criteria due to the higher variability of this surface in comparison with the others.
- **PA-16 porous asphalt**. 45 tests were carried out, using 3 samples under 3 clogging scenarios and for 5 different surface slopes.

#### 4.1.1 ANALYSIS OF THE INFILTRATION RATES OF A PERMEABLE PAVEMENT IN LABORATORY

A total of 775 infiltration rates results were obtained (5 measurements corresponding with the 5 collection chambers underneath the CFI per test for a total of 155 tests).

All linear regression models are presented below in Table 9. These linear regression models were obtained under the laboratory conditions detailed previously for a 95% confidence level, fulfilling the statistical criteria of analysis of co-linearity,



independence of observations, normality of the standardised residues of the dependent variable, and homocedasticity (Anexo 1).

Table 9. Regression linear models for all permeable pavement surfaces analyzed under the two main scenarios of clogging simulated: newly built surface and clogged surface.

SURFACE	CLOGGING SCENARIO	LINEAR REGRESSION MODEL	R <sup>2</sup>	Student's t		
				C	R <sub>SL</sub>	S <sub>S</sub>
Concrete blocks	Newly built surface	$C_{IR} = 10.256 + 2.049 \cdot R_{SL} - 3.255 \cdot S_S$	0,95	4.265	34.015	-13.001
	Clogging surface	$C_{IR}^{1/2} = 1.336 + 0.156 \cdot R_{SL} - 0.368 \cdot S_S$	0,87	3.716	18.125	-9.865
Porous concrete	Newly built surface	$C_{IR} = 6.262 + 2.074 \cdot R_{SL} - 3.774 \cdot S_S$	0,85	1.438	18.637	-8.168
	Clogging surface	$C_{IR} = 7.741 + 2.094 \cdot R_{SL} - 4.158 \cdot S_S$	0,88	1.994	21.164	-10.007
Porous asphalt	Newly built surface	$C_{IR} = 8.868 + 2.044 \cdot R_{SL} - 4.406 \cdot S_S$	0,87	1.963	17.805	-11.302
	Clogging surface	$C_{IR}^{1/2} = 1.324 + 0.213 \cdot R_{SL} - 0.436 \cdot S_S$	0,89	3.565	22.406	-11.057

The concrete block pavement has variable infiltration behaviour during its operational life as can be observed in Table 9. In all regression models obtained for this permeable surface, an increase in the independent variable  $R_{SL}$  produces an increase in the dependent variable  $C_{IR}$ . Negative sign of the variable  $S_S$  in all regression models under all scenarios of clogging shows that an increase in the surface slope produces a decrease in the infiltration rates. Moreover, the influence of the constant in all models is quite low based on the Student's t values in Table 9.

Another important point is the analysis of the influence of the sediments in the models. As can be seen in Figure 15 and Table 9, the lack of sediments in the sample corresponding with the newly built scenario of clogging, produces a very low variability in the models, as can be checked through the high  $R^2$  values obtained for this model. However, the addition of sediments and its consequent clogging scenario shows a lower  $R^2$  value, increasing the variability of the model. This variability needed to be addressed properly through the transformation of the dependent variable to linearity as can be seen in Table 9 and Figure 16. This transformation consisted in one mathematical operation taking the square root of the dependent variable.

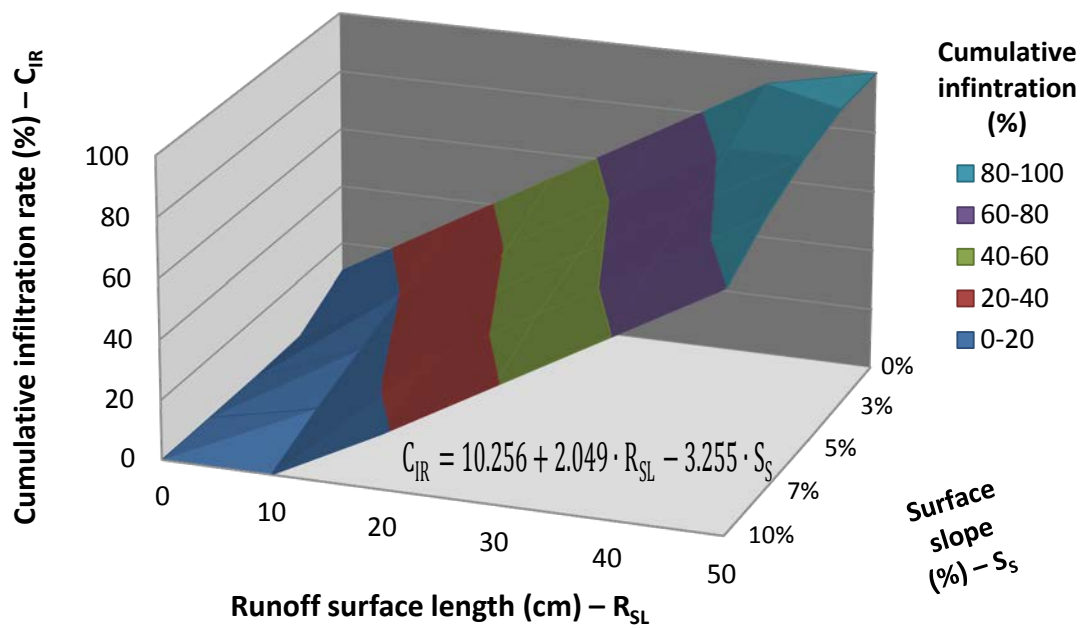


Figure 18. 3-D representation of the regression linear model for ICBP surface under newly built clogging scenario.

It is important to limit the range of validity of these models from a hydrological point of view to avoid the mathematical possibility of a negative cumulative infiltration rate. This fact occurs when the independent variables reach their extreme values, combining higher values of  $S_s$  and lower values of the  $R_{SL}$  in the case of the newly built surface scenario of clogging. Due to the fact that the model obtained for the clogged scenario needed a transformation by using the square root of the dependent variable, no negative cumulative infiltration variables are going to appear. So, in this case the model is valid for all treatments.

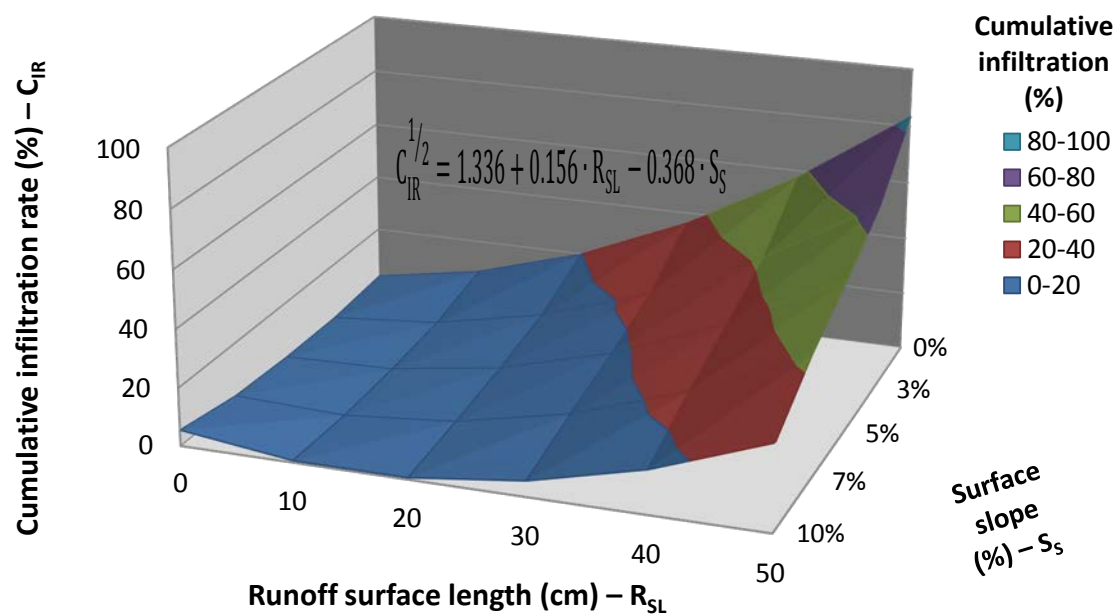


Figure 19. 3-D representation of the regression linear model for ICBP surface under clogged surface scenario.

Another two regression linear models were obtained for the porous concrete surface as can be observed in Table 9, Figure 17 and Figure 18.

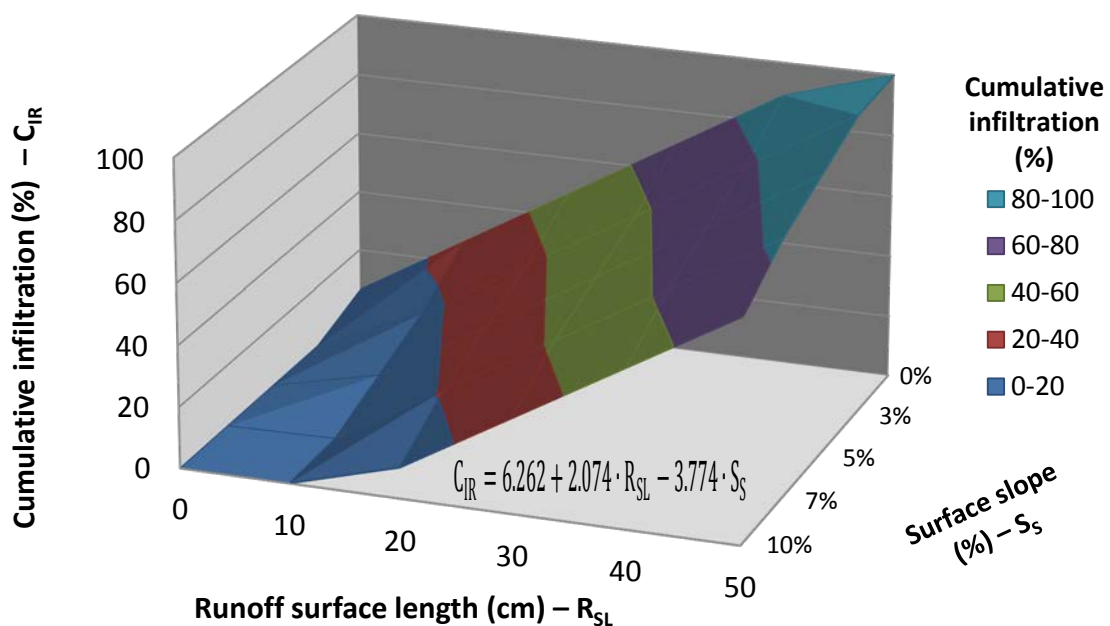


Figure 20. 3-D representation of the regression linear model for the porous concrete surface under newly built clogging scenario.

The same patterns found out for the ICBP surface in the scenario of clogging of newly built surface can be seen as well in the porous concrete surface.

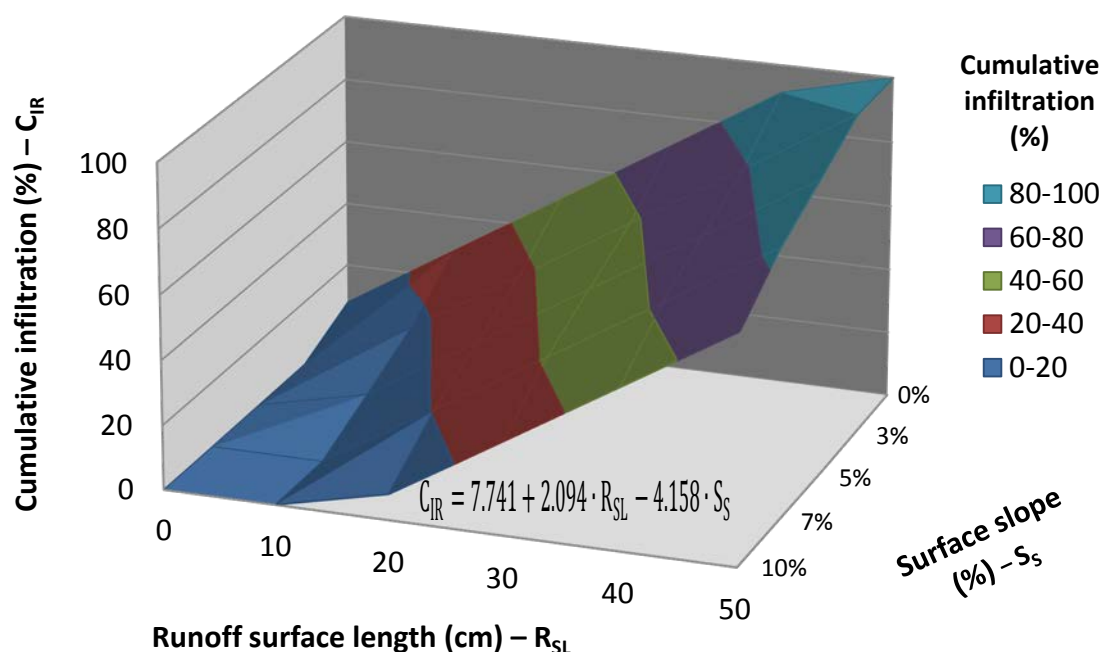


Figure 21. 3-D representation of the regression linear model for the porous concrete surface under clogged surface scenario.

The limits of validity in this case occur when the independent variables reach their extreme values, combining higher values of  $S_S$  and lower values of the  $R_{SL}$ .

The main difference discovered between the ICBP surface and the porous surface in clogged surface scenario is that the second one surface did not need a transformation of the variable to accomplish with the statistical criteria. Again, high values of  $R^2$  demonstrated a high reliability in the models, even in the case of clogged surface.

The range of validity for this scenario follows the same patterns than the newly built scenario of clogging.

Finally, the porous asphalt surface was analyzed to compare with the rest of the permeable surfaces.

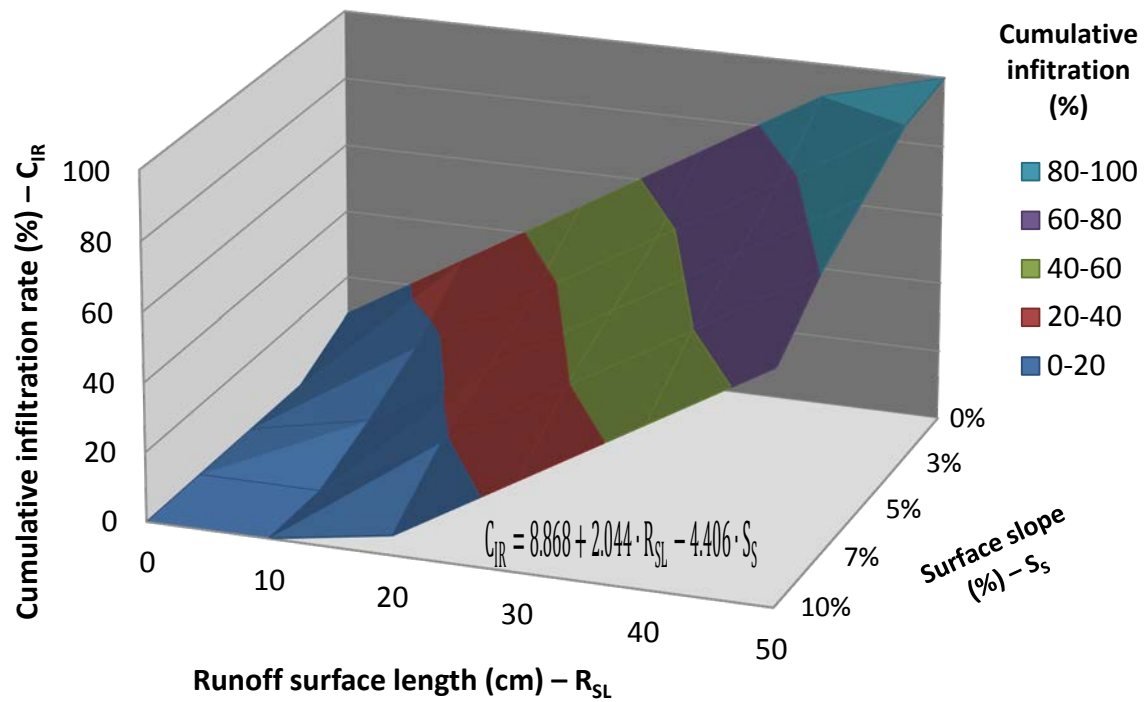


Figure 22. 3-D representation of the regression linear model for the porous asphalt surface under newly built clogging scenario.

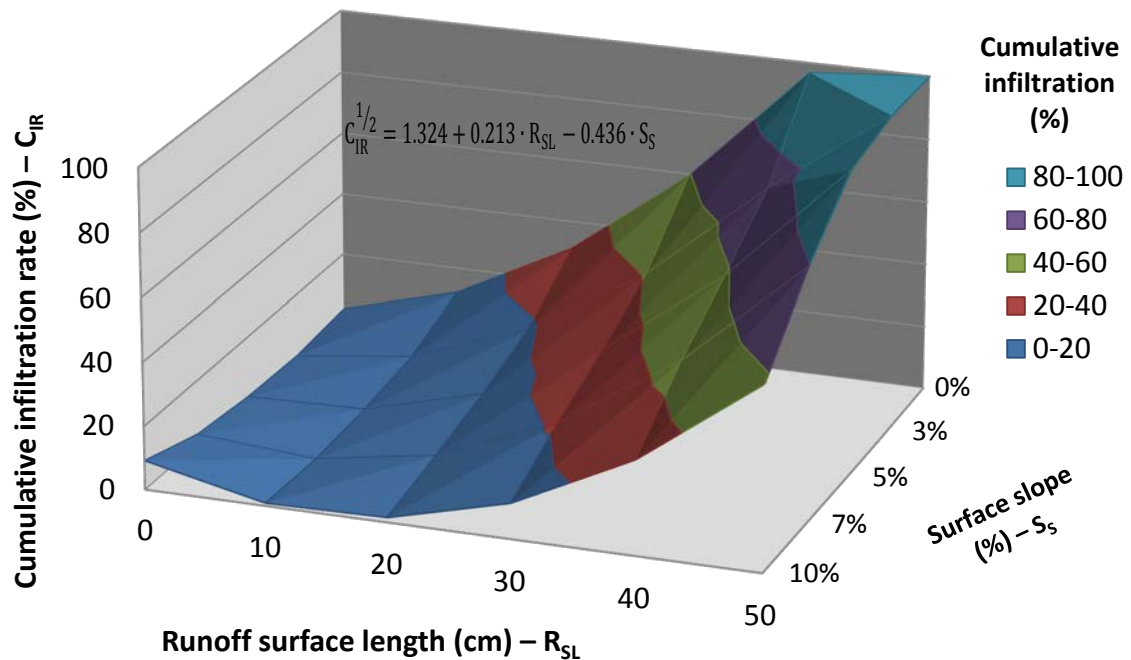


Figure 23. 3-D representation of the regression linear model for the porous asphalt surface under clogged surface scenario.

The porous asphalt surface continued with the same patterns noticed in the

previous examinations, and again the sediments produced enough variability to force the transformation of the dependent variable as occurred in the concrete blocks surface. The same transformation was carried out with good results of  $R^2$  and good predictability.

The range of validity followed the same patterns than in the rest of the permeable surfaces.

As a final conclusion of all the regression linear models obtained, it can be said that the most influential variable in all cases is the  $R_{SL}$  as can be checked in Table 9, showing a positive relation with  $C_{IR}$ .  $S_s$  also has an important impact on the models and its relation is negative with the dependent variable as was explained before. Again, the constant does not have a significant influence on the models obtained. This point together with high  $R^2$  make these regression models a good predictor of the infiltration behaviour of permeable surfaces in the laboratory.

#### **4.1.2 ANALYSIS OF A PERMEABLE PAVEMENT RUNOFF IN THE LABORATORY**

The analysis of the permeable pavement runoff in the laboratory was developed using the results of the tests with the CFI to check the real influence and impact of the maintenance operations in the generation of residual runoff in every permeable surface analyzed.

As can be seen in Figure 21, the application of maintenance operations produces a recovery of the infiltration capacity of 10% from the clogged scenario for interlocking concrete block pavement. The singular case that can be notice for the surface slope of 5% after the maintenance operations can be explained taking into account that those maintenance operations not only take away some of the sediments but also in this particular case the kinetic energy contributed to an increase in the compaction in the remaining sediments within the joints between the blocks. This observation only occurred in this type of surface due to the differences with the rest of the surfaces.

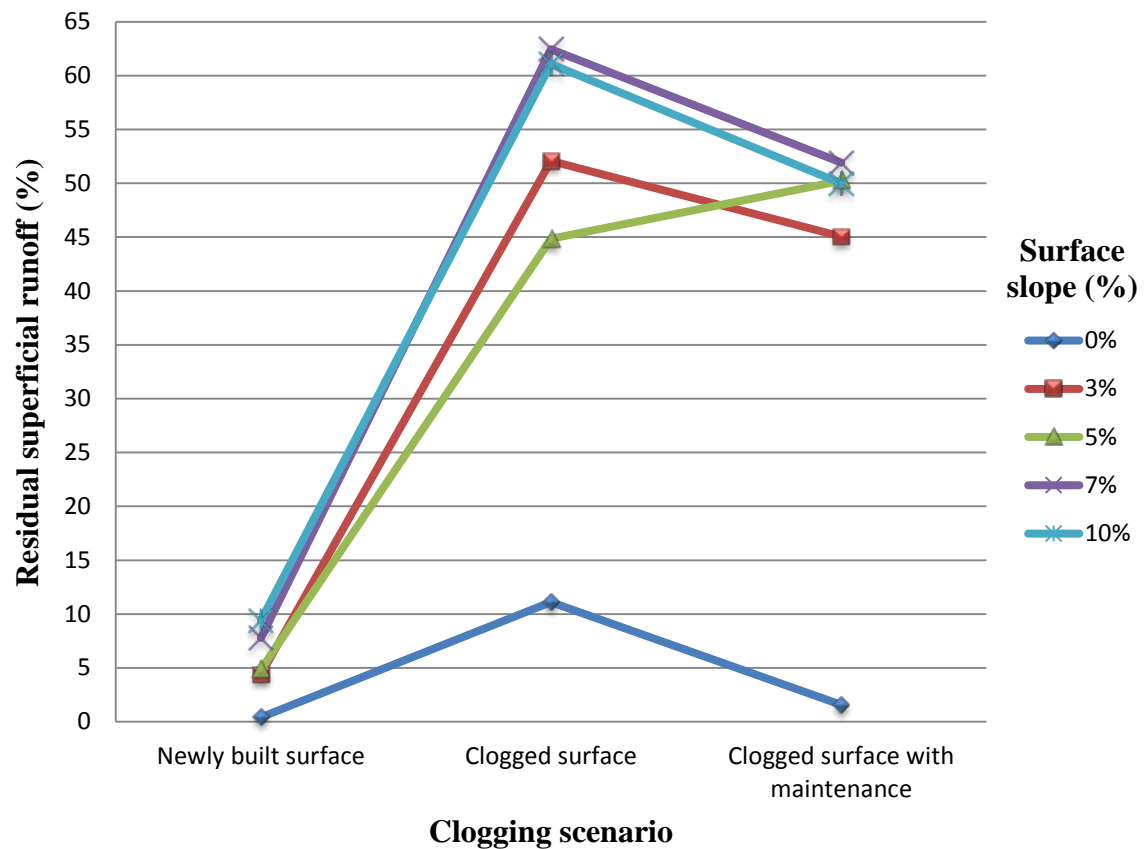


Figure 24. Residual superficial runoff for the concrete blocks with slots surface depending on the surface slope.

In the case of the porous concrete surface it is important to point out the low values of the reduction of the infiltration capacity, always below 8% in all clogging scenarios (Figure 22). This is possibly due to the lack of penetration of the sediments into the voids of the porous concrete.

All results of the infiltration capacity are very similar in all cases of surface slope and clogging scenarios, except for surface slopes above 7% as can be seen in Figure 22. This indicates that the flow energy of the superficial runoff is not strong enough to continue in the surface and becomes residual runoff, at least with surface slopes above 7%.

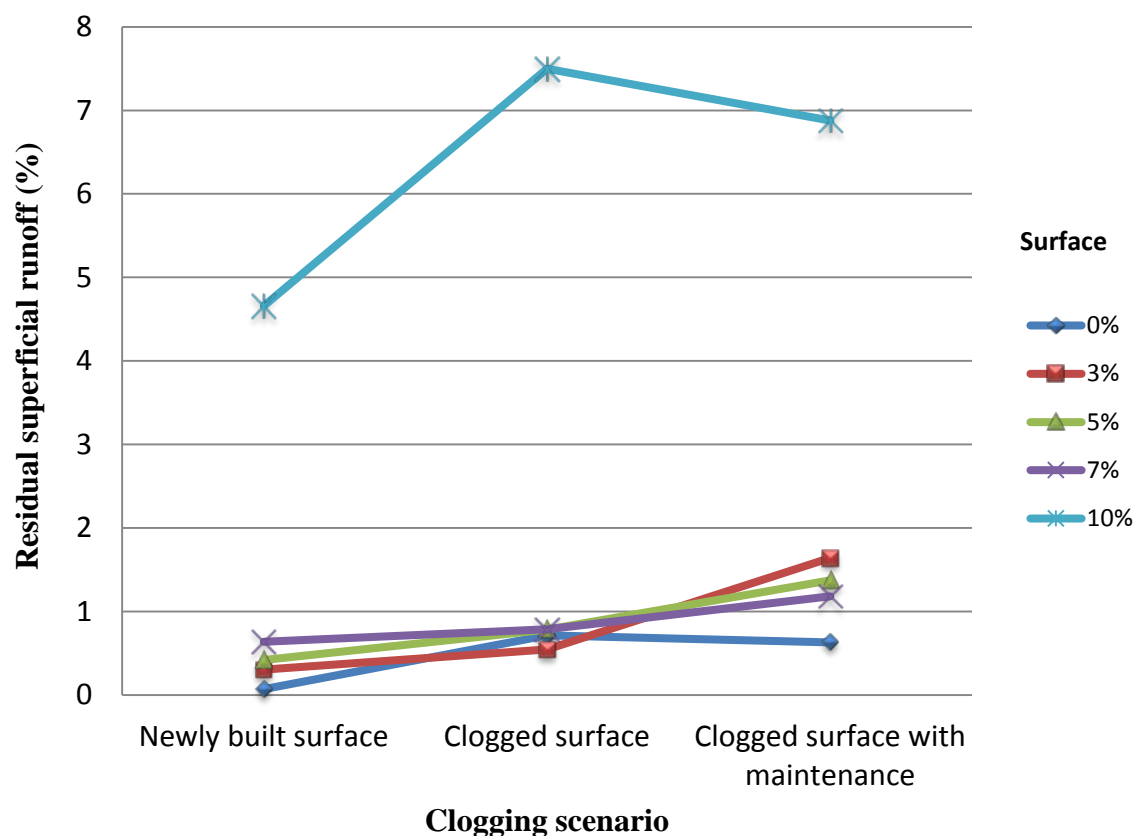


Figure 25. Residual superficial runoff for the porous concrete surface depending on the surface slope.

The third permeable surface was the porous asphalt. Reduction infiltration capacity values were always low below 17% for all surface slopes and all clogging scenarios. Maintenance operations contributed to increase the compaction effect increasing the residual runoff as can be seen in Figure 23. In spite of the fact that the differences observed between clogging scenarios were higher in the case of the porous asphalt surface than in the porous concrete surface, this difference still being not significant (Figure 23).



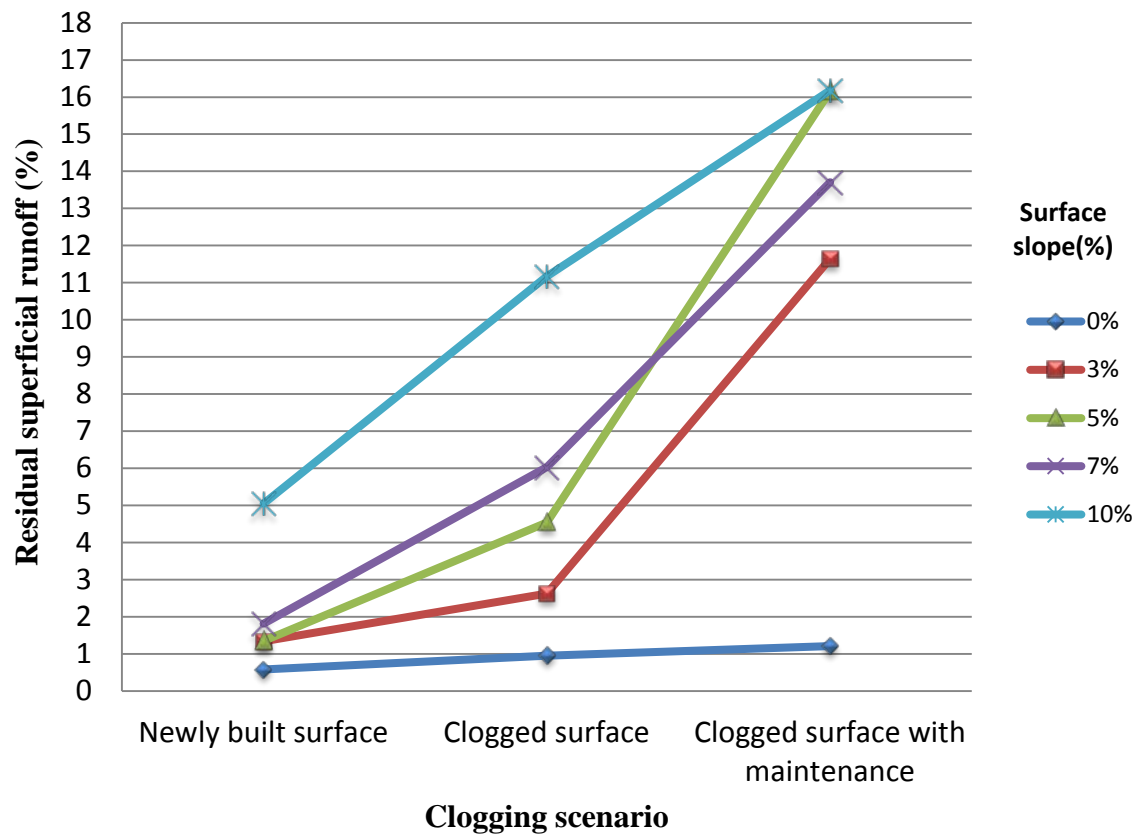


Figure 26. Residual superficial runoff for the porous asphalt surface depending on the surface slope.

Finally, a brief analysis of the geotextile performance in the sections of permeable pavements with porous mixtures (porous concrete and porous asphalt) was carried out in laboratory.

Table 10. Values of the tests carried out on the geotextiles of the permeable pavement with porous mixtures surfaces of water permeability normal to the plane and determination of mass per unit area.

Permeable surface sample	Water permeability normal to the plane according to UNE-EN ISO 11058 (2010) (mm/s)	Determination of mass per unit area according to UNE-EN ISO 9864 (2005) (g/m <sup>2</sup> )
New geotextile	155.1 ± 48.3	148
Porous concrete 1	138.8 ± 23.4	230
Porous concrete 2	159.8 ± 39.2	171
Porous concrete 3	150.3 ± 29.0	152
Porous concrete 4	158.0 ± 37.1	204
Porous concrete 5	165.2 ± 41.1	186
Porous asphalt 1	160.5 ± 35.8	157
Porous asphalt 2	142.5 ± 27.6	216
Porous asphalt 3	163.5 ± 43.5	137

The geotextile used in this research had a high permeability of 155.10 mm/s in the case of the newly built surface (Table 10). However, permeabilities of 154.42 and 155.50 mm/s were obtained after clogging in porous concrete and porous asphalt surfaces, respectively. In addition, the average mass measured after clogging was 188.60g/m<sup>2</sup> in the case of PMPC and 170 g/m<sup>2</sup> in the case of the PA-16 surface (Table 10). Hence, 38.60 and 20 g of sediments were retained by the geotextile per m<sup>2</sup>, corresponding to 7.72 and 4% of the total amount of sediments used to clog porous concrete and porous asphalt porous mixtures surfaces, respectively. In spite of the important amount of sediments trapped in the geotextile, permeability did not decrease. This fact is explained by the degradation observed in the geotextile, producing local spaces in which the local permeability was much higher than the permeability of a newly built surface. Moreover, the majority of the sediments used to clog the porous surfaces were retained by upper layers such as the surface layer and the base layer.



Figure 27. Detail of the sediments that infiltrated through the surface and the base layers and got trapped by the geotextile.

## 4.2 TEST OF PERMEABLE PAVEMENT HYDRAULIC BEHAVIOUR IN THE LABORATORY

### 4.2.1 ANALYSIS OF THE INFILTRATION RATES OF A PERMEABLE PAVEMENT

The analysis of the hydraulic behaviour of permeable pavements in the laboratory begins with the analysis of the infiltration rates. This analysis is divided into the three different permeable pavement sections studied in this research.

Firstly, the CONTROL section is analyzed. This type of section has a low retention capacity against a rainfall event with intensities above 100 mm/hr. As a reference, a drop of water lasted around 30 seconds in going through the entire section, independently of the rainfall intensity as can be seen in the discharge hydrograph in Figure 15.

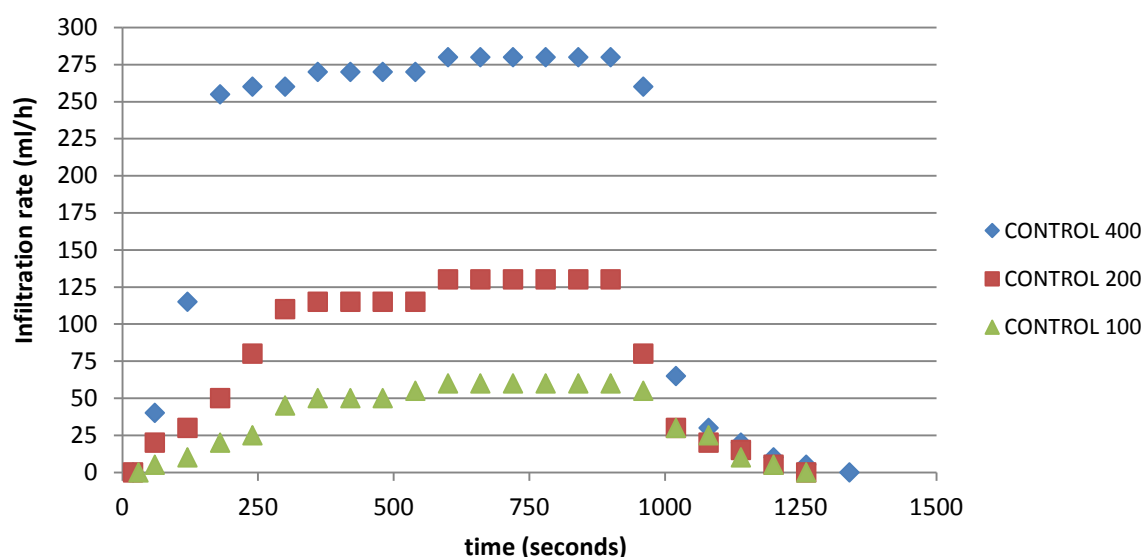


Figure 28. Discharge hydrograph for the section CONTROL represented by the infiltration rates for rainfall intensities of 100, 200 and 400 mm/h.

In all cases the peak-flow of the effluent is reached around 10 minutes after the beginning of the rainfall simulation. Once the rainfall event ended, the CONTROL treatment reacts instantaneously, drastically reducing the effluent flow up to values close to 0 ml/minute.

The second stage consisted of the analysis of the section called OASIS 1.3 (1.3cm thick). In this case, the addition of water in the simulation continued until the steady-state stage was reached. Therefore, it will be necessary to compare with the CONTROL

treatment in terms of the number of events of 15 minutes necessary to reach the steady-state stage. As can be seen in Figure 16, the effluent flow for OASIS 1.3 began after 3 minutes from the beginning of the test as an average value. In the case of 400 mm/hr., 7.7 minutes in the case of 200 mm/hr, and 13.8 minutes in the case of 100 mm/hr.

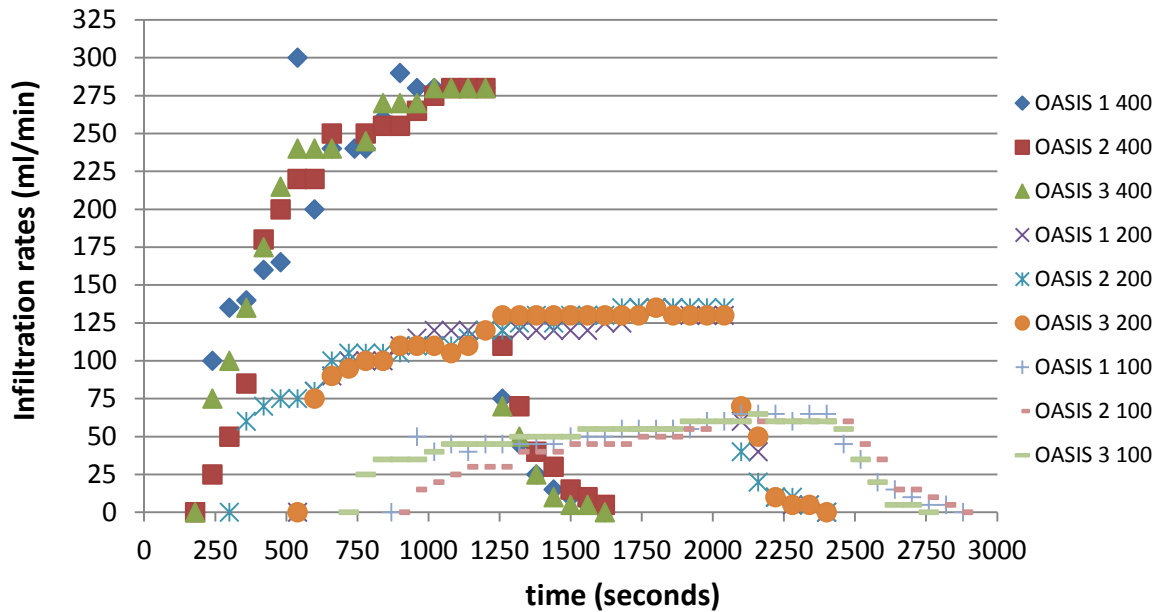


Figure 29. Discharge hydrograph for the section OASIS 1.3 represented by the infiltration rates for rainfall intensities of 100, 200 and 400 mm/h.

Displacement of the hydrograph that represents the discharge curve of the permeable pavement is clear if it is compared with the CONTROL treatment. This section needed 16.7 minutes to reach the steady-state stage for a rainfall intensity of 400 mm/hr, 25 minutes for 200 mm/hr, and 33 minutes for 100 mm/hr.

Finally, the section of OASIS 2.0 (2 cm thick) was tested. As can be seen in Figure 16, the effluent flow for OASIS 1.3 began after 5.7 minutes from the beginning of the test as an average value. In the case of 400 mm/hr, 11.3 minutes in the case of 200 mm/hr, and 19.9 minutes in the case of 100 mm/hr.

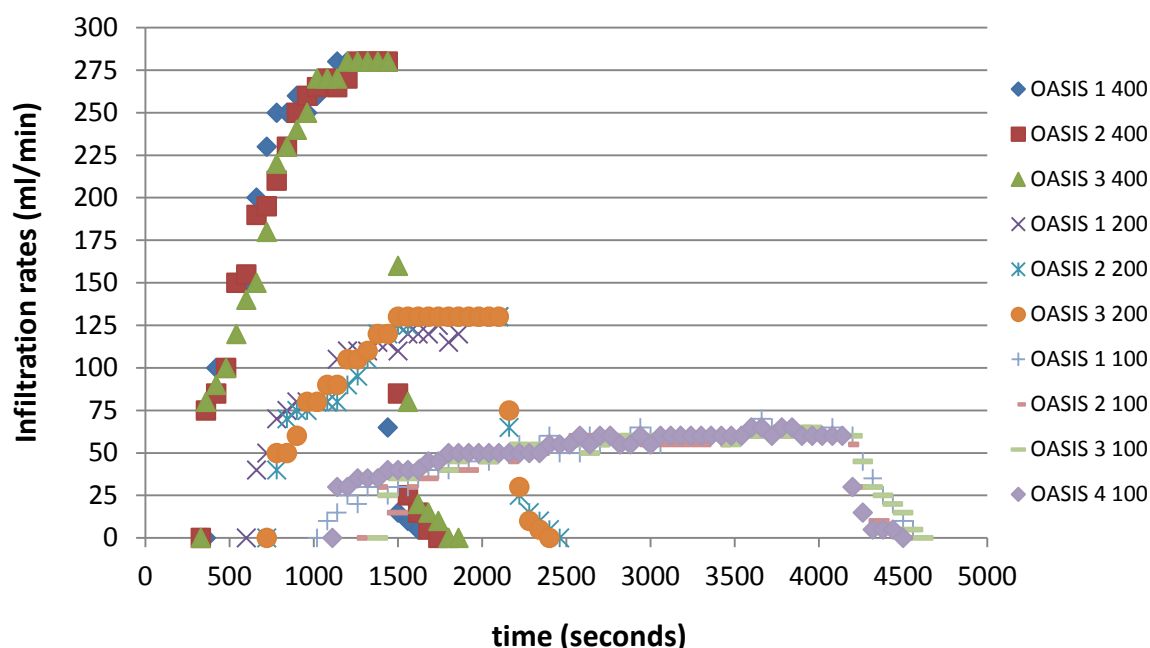


Figure 30. Discharge hydrograph for the section OASIS 2.0 represented by the infiltration rates for rainfall intensities of 100, 200 and 400 mm/h.

In this case, the effluent flow at the bottom pipe needed 20 minutes to reach the steady-state stage under 400 mm/hr of rainfall intensity, 28 minutes under 200 mm/hr, and 42.7 minutes under 100 mm/hr.

#### 4.2.2 OASIS® PERFORMANCE ZONES

In order to analyze the performance zones of the OASIS®, it is necessary to study the different stages defined before in the methodology. These stages were an initial stage sub-divided into concentration and intermediate sub-stage, steady-state stage, and discharge stage.

The beginning of the effluent flow through the bottom pipe is presented in Figure 15. The time necessary to begin the effluent flow in CONTROL sections was 30 seconds in all cases. That means that during this time the flow that this section is able to attenuate is 0.83 L/m<sup>2</sup> in the case of 100 mm/hr of rainfall intensity, 1.67 L/m<sup>2</sup> in the case of 200 mm/hr, and 3.33 L/m<sup>2</sup> in the case of 400 mm/hr. As an example of the impact of these results in a real car park ("Las Llamas experimental parking area in Santander), these attenuations obtained earlier can be translated into attenuation volumes, being 1512 L

(3,33 L/m<sup>2</sup>), 756 L (1,67 L/m<sup>2</sup>), and 378 L (0,83 L/m<sup>2</sup>). These volumes are the result of consider 45 car park bays with a surface of 4.2 x 4.2 m<sup>2</sup>, for a total surface of 453.6 m<sup>2</sup>.

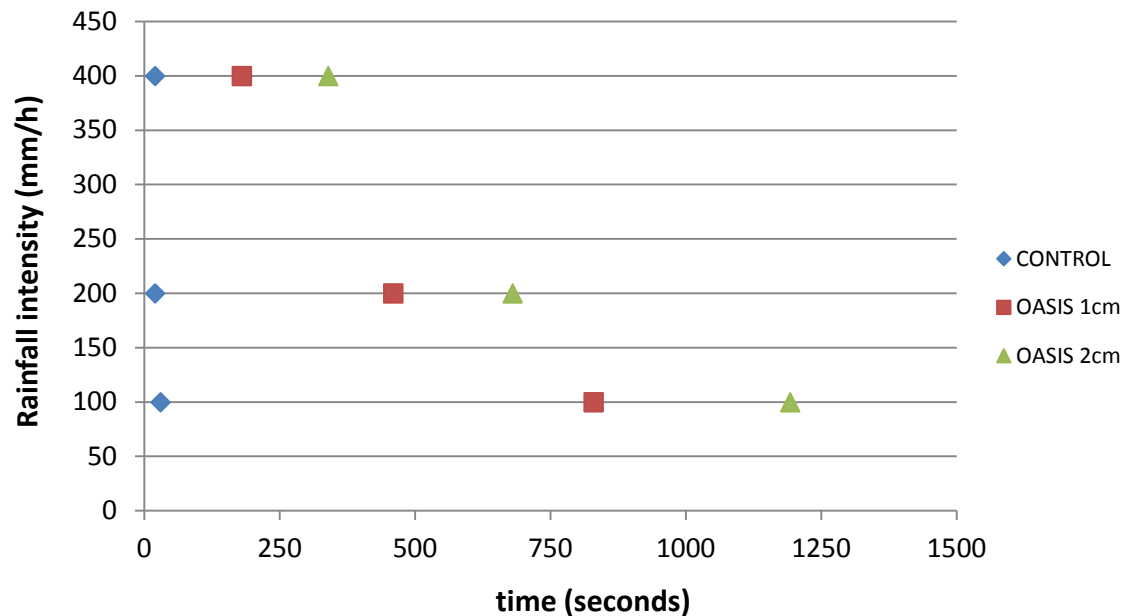


Figure 31. Beginning of the effluent flow through the bottom pipe.

In the case of the permeable pavement sections with OASIS® within their structure, the attenuation is much higher even in this stage as can be seen in Figure 15.

In the next figure it can be seen the time necessary to reach the steady-state stage from the beginning of the effluent flow showed in Figure 15. This time between both stages is called intermediate sub-stage in the methodology.

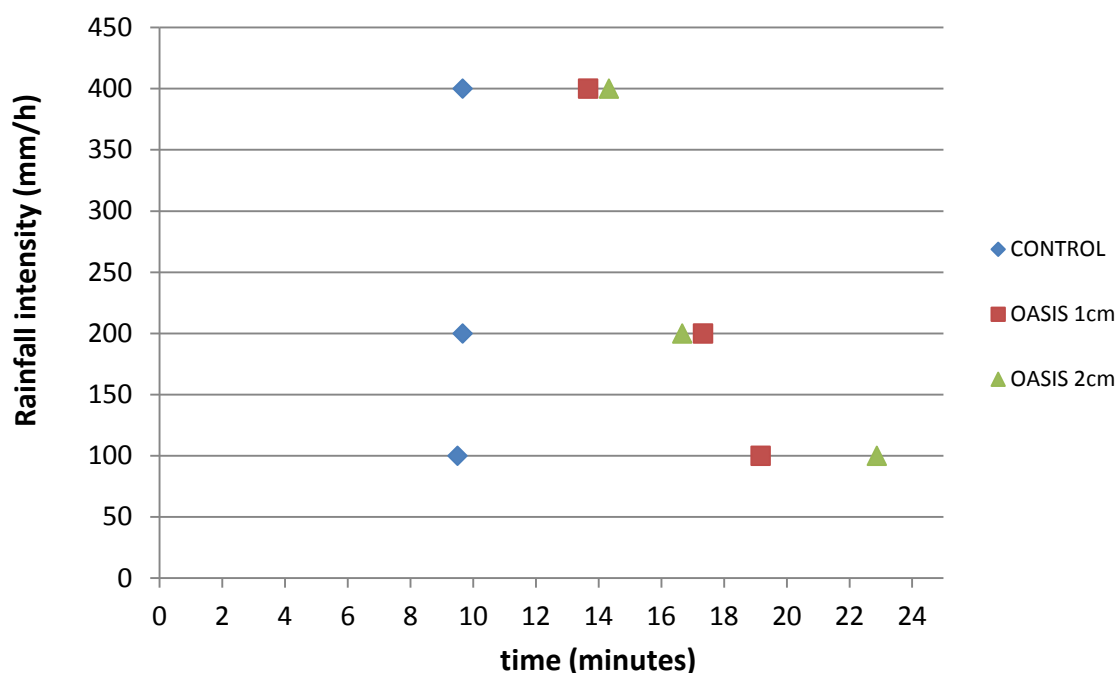


Figure 32. Time necessary to reach the steady-state stage from the beginning of the effluent flow.

The first discussion that can be done based on Figure 16 is the proof that the time of 10 minutes suggested by Davies et al. (2002) and Rodriguez-Hernandez et al. (2012), and afterwards used by Sañudo-Fontaneda et al. (2013 a, b) to reach the steady-state stage in permeable pavements in the laboratory has been confirmed in these tests. The extra attenuation provided by the OASIS® layers can be observed in Figure 15 and Figure 16, overcoming 14 minutes in all cases and can reach 23 minutes in some cases. Therefore, in the worst scenario of rainfall intensity (400 mm/hr) the attenuation can reach around 15 minutes which is the entire duration of the storm event in this research. That means that the peak-flow is going to be reached by the end of the storm event or even later. This time is even higher considering the addition of both figures and taking into account the time that permeable pavement sections with OASIS® needs to reach the steady-state stage from the beginning of the tests. Having considering this fact, it can be said that the attenuation capacity of the sections with the OASIS® would exceed return periods of 100 years cities of the world with high rainfall intensity patterns, even in the worst scenarios of less thickness (1.3 cm) and high intensity (400 mm/hr). In other cases, the return period could be in a range between 100 and 1000 years.

Once analyzed each case in detail, the scheme of the hydraulic performance of the permeable pavement structures with OASIS® will be shown in Figure 17. The limits



between all performance zones can be observed in this figure:

- **ZONE A. Absorption.** This zone corresponds with the initial stage described in the methodology. OASIS® absorbs all rainfall avoiding the infiltration process of the water toward the sub-base. In this case, it can be said that all the volume is stored more than attenuated.
- **ZONE B. Absorption and infiltration.** This zone corresponds with the second sub-stage of the initial stage when the effluent flow begins and up to the limit with the steady-state stage (intermediate sub-stage). OASIS® is not completely saturated in this zone, but it is locally saturated. This leads into the beginning of the infiltration process toward the sub-base. However, OASIS® still absorbing and storing water during this second zone.
- **ZONE C. Infiltration.** This zone corresponds with the discharge stage described in the methodology. OASIS® is fully saturated and works as a standard permeable pavement section (CONTROL), infiltrating all water. The limit between zones B and C could be considered as the end of the extra attenuation provided by the OASIS® to a standard permeable pavement section.

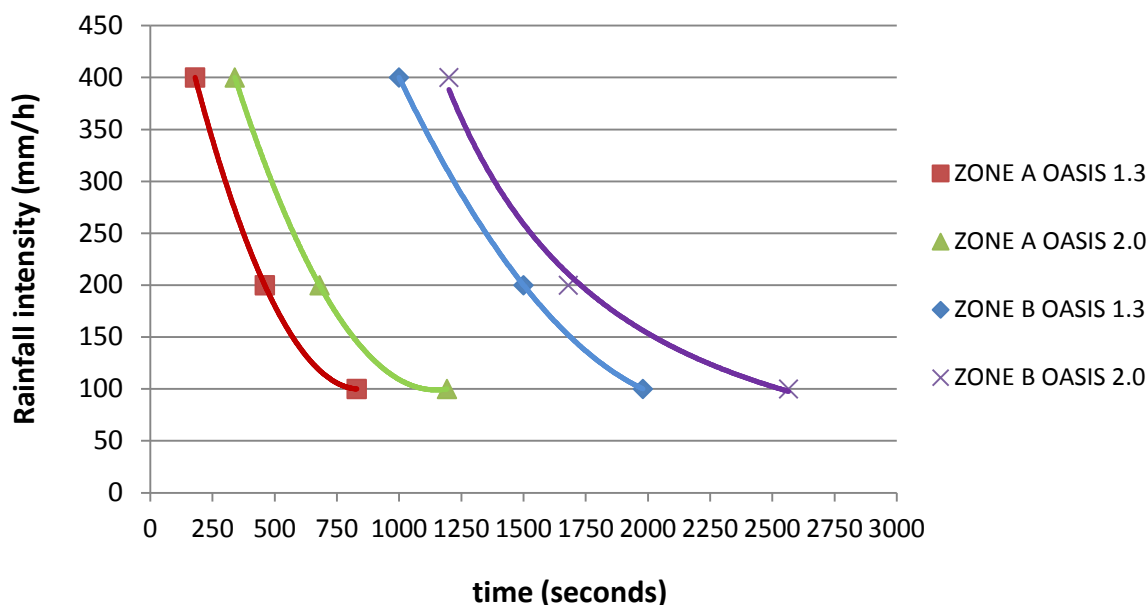


Figure 33. Scheme of the performance zones of the permeable pavement sections with the OASIS® layers.

In conclusion, 4 tests stages described in the methodology lead into 3 performance zones of the OASIS®.

### 4.2.3 ANALYSIS OF THE STORED VOLUMES IN THE PERMEABLE PAVEMENT

As a consequence of the results shown before, the interest is focused on the volumes of water that each layer of OASIS® is able to storage in each one of the zones until its saturation: performance zones A and B. Thus, as a beginning of the analysis, the volumes stored in the OASIS® during the absorption zone are shown in Table 11.

Table 11. Measured volume stored in the OASIS® in performance zone A depending on the rainfall intensity.

SECTION OF PERMEABLE PAVEMENT	RAINFALL INTENSITY (mm/h)	BEGINNING EFFLUENT FLOW (minutes)	STORED VOLUME (L)
OASIS 1.3	400	3.0	<b>0.900</b>
	200	7.7	<b>1.150</b>
	100	13.8	<b>1.038</b>
OASIS 2.0	400	5.7	<b>1.700</b>
	200	11.3	<b>1.700</b>
	100	19.9	<b>1.491</b>

Volumes presented in Table 10 showed very similar values, leading into the hypothesis that the stored volume in the OASIS® is independent of the rainfall intensities simulated.

Total volumes registered during performance zones A and B are shown in Table 12. These volumes represent the total volume stored in the OASIS®. Volume of water used in each test to simulate rainfall events of 15 minutes in a row was a function of the time necessary to reach the peak-flow (steady-state stage of infiltration). That explains the differences showed in Table 12. The column showing infiltrated water refers to the volume of water infiltrated during the entire tests included that water that continued infiltrating during the next 24 hours.

Table 12. Total average volume stored (zones A and B) in the OASIS® layer depending on the rainfall intensity.

SECTION OF PERMEABLE PAVEMENT	RAINFALL INTENSITY (mm/h)	WATER USED IN THE TESTS (L)	WATER INFILTRATED (L)	STORED VOLUME IN OASIS® (L)
<b>OASIS 1.3</b>	400	6.000	4.493	<b>1.507</b>
	200	5.100	3.603	<b>1.497</b>
	100	3.025	1.697	<b>1.328</b>
<b>OASIS 2.0</b>	400	7.100	4.783	<b>2.317</b>
	200	5.250	2.967	<b>2.283</b>
	100	5.206	3.010	<b>2.196</b>

Finally, a comparison between the total average volume in all tests carried out with the OASIS® layers (zones A and B) and the average initial volume stored (zone A) depending on the thickness of the OASIS® is presented in Figure 15.

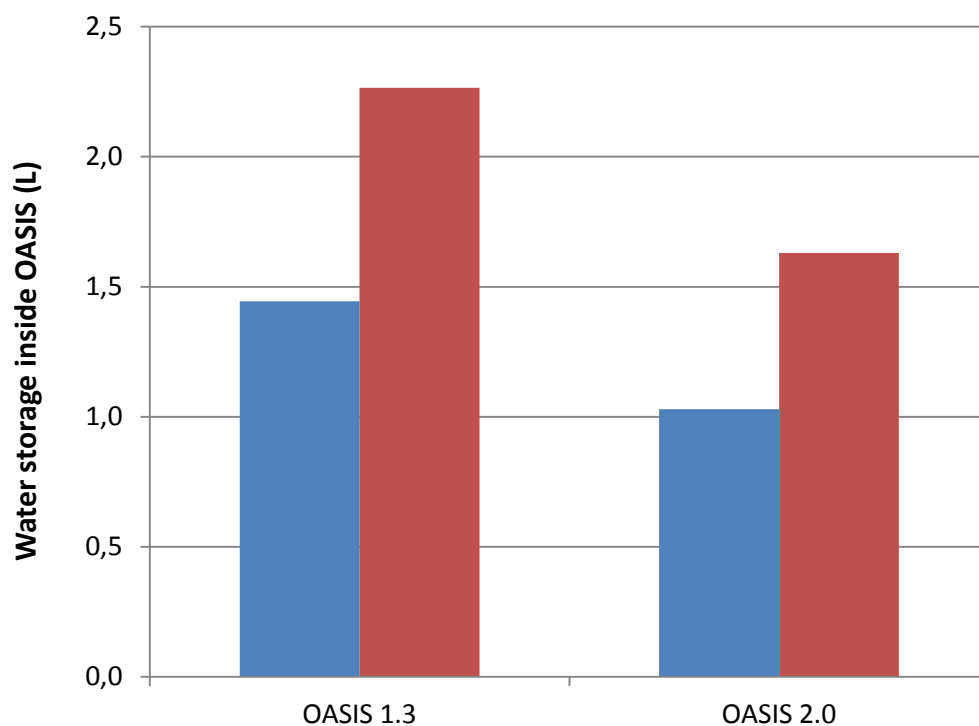


Figure 34. Comparative between the total average volume in all tests carried out with the OASIS® layers (zones A and B - left column) and the average initial volume stored (zone A – right column) depending on the thickness of the OASIS®

The percentage of water stored in the initial zone A in comparison with the total

stored water in zones A and B is 71.26% in the case of 1.3 cm thick of the OASIS® layer, whilst in the case of 2.0 cm is 71.96%.

### 4.3 TESTING OF THE DRAINAGE FUNCTION ASSESSMENT OF POROUS MIXTURES SURFACES OF POROUS CONCRETE AND POROUS ASPHALT IN THE LABORATORY AND THE FIELD

#### 4.3.1 LABORATORY TESTS

All average results obtained in the tests carried out in the laboratory on the porous concrete surfaces under a newly built scenario by using the LCS permeameter are presented below in Table 12.

Table 13. Permeability values for porous concrete samples for a newly built scenario.

Sample	Mass (kg)	Volume (m <sup>3</sup> )	Apparent density (kg/m <sup>3</sup> )	Average permeability (m/s)
1	44.950	0.025	1,798	0.0239
2	44.400	0.025	1,776	0.0201
3	44.000	0.025	1,760	0.0074
Average value			1,778	0.0172

These values obtained in Table 12 were used as a reference to obtain the reduction of the infiltration capacity in the porous concrete samples both in laboratory and in the field.

The same method was used in the porous asphalt samples, obtaining all results showed in Table 13.

Table 14. Permeability values for porous concrete samples for a newly built scenario.

Sample	Mass (kg)	Volumen (m <sup>3</sup> )	Apparent density (kg/m <sup>3</sup> )	Average permeability (m/s)
1	54,200	0,025	2168	0,0110
2	56,000	0,025	2240	0,0130
3	51,300	0,025	2052	0,0119
Average value			1778	0,0172

These results obtained in Table 14 were used as well as in the previous case of the porous concrete surface as a reference to obtain the reduction in the infiltration capacity of porous asphalt surfaces both in the laboratory and in the field.

Porous concrete used in this research has a higher infiltration capacity (40%) than porous asphalt. In both cases, the criteria of Pérez and Calzada (1990) were achieved, presenting permeability times below 50 seconds (permeability of 0.0050m/s), staying preferably between 25 and 35 seconds (0.0100 and 0.0071m/s respectively).

Once described, all initial permeability characteristics of the samples built for both types of porous mixture surface, the LCS tests for these surfaces under clogging conditions (after the two scenarios of clogging: clogged surface and clogged surface with maintenance) were carried out by using the LCS permeameter following the methodology described for this tests. 24 points with 3 repetitions per point were measured in the most clogged side of the sample (12 points per different zone identified: less clogged and clogged). All results for porous concrete are shown in Table 15 and for PA-16 porous asphalt in Table 16.

Table 15. Permeability and reduction of permeability results for porous concrete samples.

Sample	Zone	Permeability (m/s)	Permeability reduction (%)
1	Less clogged	0.0096	44.00
	Clogged	0.0167	2.84
2	Less clogged	0.0080	53.24
	Clogged	0.0149	13.02
3	Less clogged	0.0088	48.92
	Clogged	0.0165	4.00
Average value			27.67

Table 16. Permeability and reduction of permeability results for PA-16 porous asphalt samples.

Sample	Zone	Permeability (m/s)	Permeability reduction (%)
1	Less clogged	0.0024	79.62
	Clogged	0.0040	66.57
2	Less clogged	0.0045	62.67
	Clogged	0.0081	32.61
3	Less clogged	0.0033	72.20
	Clogged	0.0053	55.82
Average value			61.58

The LCS test applied to both porous surfaces showed an average difference of permeability of 58.33% after clogging scenarios (Table 15 and Table 16). The average reduction in the permeability after clogging was 33.05% for porous concrete, while the reduction for PA-16 was 64.16%, being much more influential in the latter case, using the same sediments and clogging procedure. The infiltration capacity for porous concrete after clogging was 0.012 mm/s, being nearly 2.4 times higher than PA-16's infiltration capacity (0.005 mm/s) at the same clogging level. The difference in permeability between clogged zones and less clogged zones in the same test piece, found in both surfaces after clogging, was 44.97% for the porous concrete surface and 42.50% for the PA-16 porous asphalt surface.

### 4.3.2 FIELD TESTS

For the field experiments, the study was divided into two main phases. Firstly, a descriptive analysis was carried out to determine the current hydraulic performance of the porous mixture surfaces, and secondly, a brief statistical analysis was undertaken to explain these results in more depth.

Starting with the descriptive analysis, values of the average permeability registered by using the LCS permeameter and average of the reduction of the infiltration capacity values were showed on Table 12 and Table 13 for the PMPC and PA surfaces, respectively.

Table 17. Average permeability and reduction of the infiltration capacity values registered on each measurement zone within each car park of PMPC surface and their corresponding score.

Measurement zone	Permeability (m/s)	Score	Reduction of the infiltration capacity (%)
1	0.0041	High	79.65
2	0.0069	Newly built	65.62
3	0.0047	High	76.45
4	0.0031	High	84.47
5	0.0054	Newly built	73.22
6	0.0025	High	87.62
7	0.0039	High	80.67
8	0.0040	High	79.97
9	0.0026	High	87.24
<b>Mean value</b>	<b>0.0041</b>	<b>High</b>	<b>79.43</b>

Although the average value of the infiltration capacity of the porous concrete surface presented a high decrease of 79.43% (Table 2), the average permeability value is still high (0.0041 m/s). This value can be considered 'high' in the score classification based on the criteria showed on Table 1. A highly similar decrease on the average reduction of the infiltration capacity was found out on Table 3 for the PA surface (82.04%). However, the average score was 'medium' for porous asphalt surfaces. These data started showing possible problems in the future with the permeability behaviour of this surface.



Table 18. Average permeability and reduction of the infiltration capacity values registered on each measurement zone within each car park of PA surface and their corresponding score.

Measurement zone	Permeability (m/s)	Score	Reduction of the infiltration capacity (%)
1	0.0020	Medium	83.52
2	0.0027	High	77.46
3	0.0021	Medium	82.40
4	0.0022	Medium	81.70
5	0.0030	High	74.85
6	0.0021	Medium	82.57
7	0.0017	Medium	85.61
8	0.0018	Medium	85.05
9	0.0018	Medium	85.23
<b>Mean value</b>	<b>0.0022</b>	<b>Medium</b>	<b>82.04</b>

As it can be seen on the box-plots in Figure 32, porous concrete average permeability was almost two times over the porous asphalt (0.0041 m/s for porous concrete and 0.0022 m/s for PA), while the reduction of the infiltration capacity on both porous mixtures surfaces was quite similar (79.43% in the case of the porous concrete surface and 82.04% in the case of the porous asphalt surface).

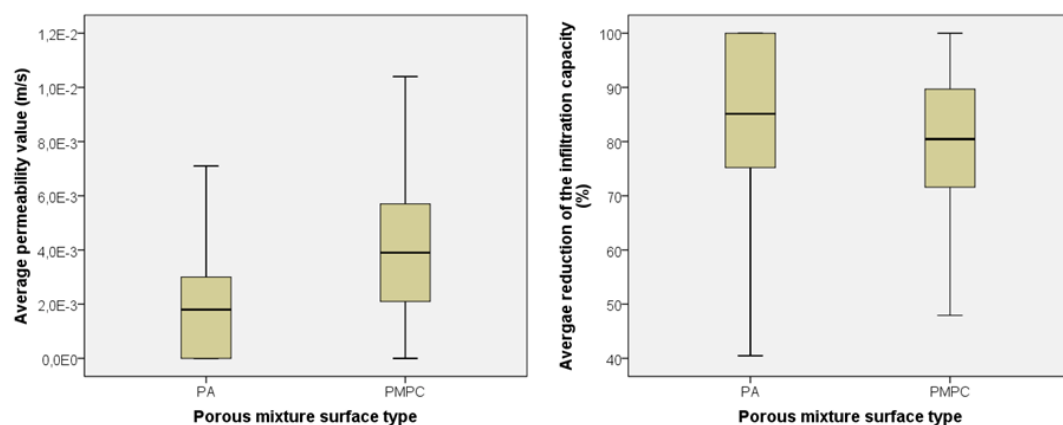


Figure 35. Box-plots of the average values of permeability and the reduction of the infiltration capacity.

Following with the statistical analysis, the initial bivariate correlation analyses

pointed out a significant linear relation between permeability values registered by using the LCS permeameter and the type of porous mixture surface (Table 19). The same pattern was shown between the permeability values and the measurement zone as can be demonstrated in Table 19. In the case of the reduction of the infiltration capacity, the measurement zone significantly influenced reduction of the infiltration capacity, while the type of surface had no significant influence on the reduction of the infiltration capacity (Table 19).

Table 19. Results of the analysis of the bivariate correlations (Spearman's Rho coefficients) between the outcome variables with the type of porous mixture surface, and the measurement zone.

Outcome variables		Type of surface	Measurement zone
Permeability	Correlation coefficient	0.369**	- 0.168*
	Significance (bilateral)	0.000	0.033
Reduction of the infiltration capacity	Correlation coefficient	- 0.149*	0.169*
	Significance (bilateral)	0.058	0.031

\*\* Correlation is significant at the level of 0.01 (bilateral).  
 \* Correlation is significant at the level of 0.05 (bilateral).

Nevertheless, the correlation coefficients were low in all cases based on the Bisquerra's classification for the correlation coefficients (Bisquerra 1987). This fact led into a more in-depth statistical analysis to confirm the results showed on Table 19. The first step was to check the normality of both outcome variables by using the Kolmogorov-Smirnov test. Both variables were not distributed according to a normal distribution. Therefore, non-parametric significance analyses were carried out, by using on the one hand a Mann-Whitney test for the type of porous mixture surface (two samples: PMPC and PA) and a Kruskal Wallis test for the measurement zone (9 samples: zones 1 up to 9) (Table 20).

Table 20. Mann-Whitney and Kruskal Wallis significance tests for the outcome variables.

Significance test	Permeability	Reduction of the infiltration capacity
-------------------	--------------	--

Mann-Whitney*	Mann-Whitney's U	1,888.5	2,716.5
	Asymptotic significance	0.000	0.058
Kruskal Wallis**	Chi square	12.493	13.329
	Asymptotic significance (bilateral)	0.131	0.101
* Grouping variable: type of porous mixture surface.			
** Grouping variable: measurement zone.			

Significance tests shown in Table 20 demonstrated that only the type of porous mixture surface significantly influenced on permeability results, whilst neither the type of porous surface nor the measurement zone had an influence on the reduction of the infiltration capacity.

Once the influence of the porous mixture surfaces was demonstrated (Table 20), it was necessary to check the real influence of the measurement zone on the outcome variables of each type of porous mixture surface. With this aim, the normality of both outcome variables was analyzed as an initial step. Porous concrete surface permeability and reduction of the infiltration capacity results were distributed according to a normal distribution, while in the case of porous asphalt surface, these results were not normal. Then, an ANOVA of one factor was carried out to analyze the influence of the measurement zones within the porous concrete on both outcome variables (permeability and reduction of the infiltration capacity), while a Kruskal Wallis test was done to analyze the influence of the measurement zone within porous asphalt on the outcome variables (Table 16).

Table 21. Significance analyses for k independent samples (measurement zones) by using the ANOVA of one factor for the case of a porous concrete surface and the Kruskal Wallis test for porous asphalt surface.

Type of surface (statistical analysis)		Permeability	Reduction of the infiltration capacity
Porous concrete (ANOVA of one factor test)	F	2.739	2.751
	Significance (bilateral)	0.011	0.010
Porous asphalt (Kruskal Wallis test)	Square Chi	4.397	4.522
	Significance (bilateral)	0.820	0.807
Grouping variable: measurement zone.			

Results presented in Table 21 demonstrate the influence of the measurement zone on permeability values and on the reduction of the infiltration capacity obtained after 5 years of use of car park bays made of porous concrete. However, in the case of porous asphalt, no influence was identified.

Therefore, both the statistical methodology and the measurement zones showed in this research can be used for present and future researches when using the LCS permeameter to study the infiltration behaviour of porous mixture surfaces on-site during their operational life.

## 5. CONCLUSIONS AND FUTURE RESEARCH

### 5.1 CONCLUSIONS

#### 5.1.1 GENERAL CONCLUSIONS

This thesis concludes with the assessment of the achievement of its main objective, having obtained a comprehensive analysis of the infiltration in several sections of permeable pavements as catchment systems for the rainwater source control to avoid flooding. This achievement was possible thanks to the laboratory and field methodology designed and developed in this thesis.

Also, the hypotheses of this thesis were checked:

- The permeable pavements studied and analyzed in this thesis both in the laboratory and on-site have presented a high capacity to catch and infiltrate rainwater, and can be used as attenuation elements to control runoff peak-flows and to reduce problems caused by flooding.
- All permeable pavements analyzed presented different behaviours under different conditions, allowing their hydraulic characterization.
- Infiltration capacity of a permeable pavement is affected by variables such as runoff surface length and surface slope, and not only by the clogging scenario.
- Permeable pavements analyzed in this thesis both in the laboratory and in the field present a high capacity of catchment and infiltration, and can be used as attenuation elements for the superficial runoff peak-flow and to decrease flooding problems.
- It is possible to diagnose unequivocally the clogging state of a permeable pavement at a particular time through the use of laboratory and field tests described in this thesis.
- It was checked that rainfall drops influenced the permeability of porous mixture surfaces because the sediments did not penetrate easily in these surfaces and then the impacts of the drops allowed washing off the surface.
- It was demonstrated that vehicles parked on a car park bay made of a porous mixture of porous concrete influenced the infiltration capacity of this surface after observing the existence of a zoning effect in these bays.

This hypothesis did not have validity on porous asphalt surfaces.

### 5.1.2 PARTICULAR CONCLUSIONS

The particular conclusions obtained in this thesis have provided a positive answer to the particular objectives that were proposed at the beginning of the thesis:

- The literature review of this thesis concluded that the most used permeable pavements across the world were those with porous concrete surfaces, followed by those made of surfaces of impervious concrete blocks with slots, and finally those with porous asphalt surfaces, focusing the development of this thesis in the study of the infiltration phenomena of these surfaces.
- The laboratory methodology used allows analysis of the superficial runoff generated in several permeable surfaces under different conditions of clogging and permeable pavement slope.
- Laboratory tests and their corresponding methodology allow the analysis of the infiltration capacity of permeable pavements under every type of rainfall intensities, storm event duration and clogging conditions.
- Test methodologies developed in this thesis allow the analysis of the hydraulic functionality of a permeable pavement and its validation through the study of a new separation layer between the base and sub-base within a permeable pavement structure.
- Field test methodologies using the LCS permeameter and the statistical analysis suggested in the thesis allow diagnosis of the hydraulic behaviour of a permeable pavement after several years of operational life.

Particular conclusions correspond to the analysis of the literature review and the discussion of the results of all tests carried out in this thesis.

#### 5.1.2.1 Literature review

1. Permeable pavements are one of the most used Sustainable Urban Drainage Systems (SUDS) across the world, representing 60% of the studies about SUDS carried out during the last 30 years.
2. The most used permeable surfaces in the world have been those made of porous concrete (61%), concrete blocks (17%), and porous asphalt (16%),

followed by those surfaces made of reinforced grass (4%).

#### **5.1.2.2 Test of the assessment of the infiltration capacity of a permeable pavement in the laboratory**

1. The new design of the Cantabrian Fixed Infiltrometer (CFI) allows simulation of direct rainfall and runoff in the laboratory on permeable pavement samples in a precise manner and with a wide range of rainfall intensities from 10 mm/hr up to 150 mm/hr.
2. The type of permeable surface significantly influenced the cumulative infiltration rate values, obtaining different linear regression models for every one of them which means a clear difference in behaviour between surfaces, especially between those with impervious concrete blocks with slots and those with porous mixture surfaces.
3. Clogging scenarios significantly influenced the cumulative infiltration rate values in the case of the impervious concrete blocks with slots, not showing this influence on the other surfaces studied (porous concrete and porous asphalt).
4. Porous mixture surfaces are not significantly affected by the sediments under the conditions used in this laboratory study.
5. Runoff surface length and surface slope variables showed a high and significant relation with the cumulative infiltration rate variable for all types of permeable surface used in this research. An increase in the runoff surface length produces an increase in the cumulative infiltration rate, whilst an increase in the surface slope (slope  $\geq 3\%$  in the case of impervious concrete blocks with slots surface and  $\geq 7-10\%$  in the case of porous mixtures surfaces) generates a decrease in the infiltration rate values and a reduction in the infiltration capacity (up to 65% in the case of impervious concrete blocks with slots and 10-15% in the case of porous mixtures surfaces).
6. High values of the  $R^2$  registered in all linear regression models obtained in this thesis were always above 0.85, showing a high level of efficiency in the prediction of the infiltration behaviour of a permeable pavement under particular test conditions in the laboratory and within the validity ranges obtained per each model.
7. The most influential variable in all regression linear models obtained for each of the two extreme clogging scenarios and for all permeable surfaces

studied in this thesis was the runoff infiltration length.

8. The influence of the linear regression model's constant in all models was low. Therefore, the study variables are the main elements that govern the infiltration phenomena in a permeable pavement.
9. Sediments used to clog the permeable surfaces as well as their application system slightly increased the variability of the regression linear models in the concrete blocks surface (this being this surface most affected by the addition of sediments), leading the  $R^2$  values from a 0.95 when the surface was built (no sediments) up to 0.87 when the surface is clogged.
10. Sediments used to clog the permeable surfaces as well as their application system slightly decreased the variability of the regression linear models on porous mixtures surfaces (being this surfaces less affected by the addition of sediments than the concrete blocks surface), increasing the  $R^2$  values 0.03 in the case of porous concrete and 0.02 in the case of the porous asphalt.
11. The type of permeable pavement used influenced the patterns of the superficial runoff generation. Impervious concrete blocks with slot surfaces were more affected by the clogging process, presenting high values of the superficial runoff up to 65%, whilst porous mixture surfaces showed lower runoff values up to 10-15%.
12. Clogging scenarios significantly influenced the generation of superficial runoff in the permeable surface made of concrete blocks, whilst it did not have influence on the porous mixtures surfaces due to the low efficiency of the sediments to block the surface, allowing the pass of water through them.
13. The slope of the permeable surfaces had a bigger influence than the clogging scenario in the generation of superficial runoff in all types of permeable surface studied, increasing the superficial runoff proportionally with the increase of the surface slope.
14. Maintenance operations carried out by using sediment sweeping in the surfaces of concrete blocks contributed to a recovery of its infiltration capacity, partially because this surface was the most affected by the presence of sediments.
15. Operations of maintenance by using a sweeping method on porous mixture surfaces produced an increase in the runoff generation (1% in porous concrete surfaces for surface slopes  $\leq 10\%$ , and 7-10% in porous asphalt



surfaces for surface slopes  $\geq 3\%$ ) because this method encouraged the penetration and compaction of the sediments in the surface voids.

16. In spite of the fact of the similarities observed between both porous mixture surfaces in terms of superficial runoff, the differences between them were significant, maintaining a certain independence regarding their infiltration capacity in the laboratory. The porous asphalt is the surface with the highest superficial runoff (16% in the case of the maximum surface slopes versus 7% for the maximum slopes in the porous concrete surfaces).
17. Sediments passing through the porous mixture surfaces did not produce a significant reduction in the infiltration capacity, in the geotextile used in this research, underneath the base layer of the structure of the permeable pavement sections studied.

#### **5.1.2.3 Test of permeable pavement hydraulic behaviour in the laboratory**

1. A section of conventional permeable pavement presents an infiltration through its whole structure almost instantaneously (30 seconds) under extreme rainfall events tested in this thesis (100, 200 and 400 mm/hr).
2. A section of conventional permeable pavement reaches the infiltration peak-flow within the first 10 minutes of an extreme rainfall event.
3. A conventional permeable pavement section improved by using an OASIS® layer presents three main phases in its infiltration behaviour: absorption, absorption and infiltration mixture, and infiltration phase.
4. A 1.3 cm thickness layer of OASIS® is able to absorb an entire rainfall event of 15 minutes of duration with intensities above 100 mm/hr, avoiding the pass of water through it toward the sub-base layer.
5. Greater thicknesses of OASIS® layer use in this thesis (2.0 cm) are able to absorb at least a rainfall event of 20 minutes of duration for intensities above 100 mm/hr, avoiding the pass of water through it toward the sub-base layer.
6. OASIS® provides a great storage capacity of 1.444 L (1.3 cm OASIS® layer) and 2.265 L (2.0 cm OASIS® layer) allowing it to act as an attenuation element of the runoff peak-flow and as an extra storage element within the permeable pavement structure at the same time.
7. 72% of the total volume of water storage inside OASIS® was absorbed during the absorption phase for all thicknesses studied in this thesis.

8. An increase of 0.7 cm in the thickness of the OASIS® layer produced and increase close to 37% in the total volume of water storage in this layer, being a little bit more than 1% of storage capacity per each mm of thickness in this layer.
9. Storage capacity of OASIS® could be considered independent from rainfall intensities.
10. It can be concluded that OASIS® is able to attenuate rainfall intensities up to 100 years return period in cities with high extreme rainfall patterns, even with 1.3 cm thick and higher rainfall intensities (400 mm/hr). In the rest of the cities studied in this research, OASIS® is able to attenuate rainfall intensities corresponding with 100-1000 years return periods for 15 minutes of storm duration.

#### **5.1.2.4 Testing of the drainage function assessment of porous mixtures surfaces of porous concrete and porous asphalt in the laboratory and the field**

1. Tests for the drainage functionality of a permeable pavement on-site by using the LCS permeameter help to diagnose real locations, therefore limiting conclusions obtained to the placement analyzed in this thesis, will not being possible to generalize using these particular conclusions before studying other placements under different conditions.
2. Permeability differences detected in the experimental car park of “Las Llamas” between both porous mixture surfaces still being significant after 5 years of operation, being the porous concrete surface with the highest initial and currently permeability.
3. The type of porous mixture surface does not influence the reduction of the infiltration capacity of the car park bays in “Las Llamas” parking area, being all them subjected to the same sediment input, the same vehicle occupation and the same rainfall patterns.
4. Degradation of the car park bays made of porous concrete presents a zoning due to the action of the vehicles, showing less permeability in those zones under the path of the wheels after 5 years of operation in the parking area.
5. Degradation of the car park bays of porous asphalt does not present zoning after 5 years of operation as a car park.



## 5.2 FUTURE RESEARCH

As my predecessors in the research line based on permeable pavements in the Construction Technology Applied Research Group (GITECO) pointed out, there are many different ways to continue researching on permeable pavements. Nevertheless, and with the aim to be very focused on the thesis, the main proposals which arose from this work and could produce theses, scientific publications, patents or research projects are presented below:

1. Study of the influence of the rainfall intensity and the duration of the storm on the infiltration rates of several sections of a permeable pavement.
2. Study of the new designs of geotextiles to attenuate the runoff peak flow within the structure of a permeable pavement.
3. Application of the infiltration behaviour studies carried out in this thesis in other SUDS such as filter drains.
4. Study of the influence of the new product called OASIS® that was briefly analyzed in this thesis for the improvement of the hydraulic features of a permeable pavement depending on this location within its structure.
5. Development of new more precise rainmakers for the simulation of any range of rainfall intensity in laboratory and on-site.
6. Improvement of the Cantabrian Fixed Infiltrometer (CFI) laboratory device in order to simulate rainfall intensities above 150 mm/hr which is the upper limit of the device currently.
7. Study of the sediments migration profile within the structure of a permeable pavement depending on the rainfall intensity and the duration of the storm.
8. Measurement of the evapotranspiration of the rainwater storage within the sub-base layer of a permeable pavement depending on different climatic conditions.
9. Study in detail of the hydraulic and strength properties of the new material OASIS® within a permeable pavement structure based on the results of this research.
10. Study of the real influence of the relation between an increase of the OASIS® layer thickness and the increase in the attenuation and storage

capacity.

11. Analysis and monitoring of the reduction of the infiltration capacity of several sections of permeable pavements depending on the sediments nature and amount, climatic conditions, rainfall patterns, vehicles occupation, and permeable pavement's age.

### 5.3 SCIENTIFIC AND ACADEMIC PRODUCTION OF THIS THESIS

Scientific articles published in indexed journals of the Journal Citation Report (JCR) (peer review):

1. Sañudo-Fontaneda, L.A.; Charlesworth, S.M.; Castro-Fresno, D.; Andrés-Valeri, V.C.A.; and Rodríguez-Hernandez, J. (2014). 'Water quality and quantity assessment of pervious pavements performance in experimental car park areas'. *Water Science and Technology*, 69 (7), pp. 1526-1533.
2. Nnadi, E.O.; Coupe, S.J.; Sañudo-Fontaneda, L.A.; Rodríguez-Hernandez, J. (2014). 'An Evaluation of Enhanced Geotextile Layer in Permeable Pavement to Improve Stormwater Infiltration and Attenuation'. *International Journal of Pavement Engineering*. Article in press. DOI: 10.1080/10298436.2014.893325.
3. Sañudo-Fontaneda, L.A.; Andrés-Valeri, V.C.A.; Rodríguez-Hernandez, J.; and Castro-Fresno, D. (2014). 'Field study of the reduction of the infiltration capacity of porous mixtures surfaces'. *Water* 6 (3), pp. 661-669.
4. Sañudo-Fontaneda, L.A.; Rodríguez-Hernandez, J.; Calzada-Pérez, M.A.; and Castro-Fresno, D. (2013). 'Infiltration behaviour of Polymer-Modified Porous Concrete and Porous Asphalt surfaces used in SUDS techniques'. *Clean –Soil, Air, Water* 42 (2), pp. 139-145.
5. Sañudo-Fontaneda, L.A.; Rodríguez-Hernandez, J.; Vega-Zamanillo, A.; and Castro-Fresno, D. (2013). 'Laboratory analysis of the infiltration capacity of Interlocking Concrete Block Pavements in car parks'. *Water Science and Technology*, 67 (3), pp. 675-681.
6. Castro-Fresno, D.; Andrés-Valeri, V.C.A.; Sañudo-Fontaneda, L.A.; and Rodríguez-Hernández, J. (2013). 'Sustainable Drainage Practices In Spain, Specifically Focused On Pervious Pavements'. *Water*, 5 (1), pp. 67-93.

Contributions to international conferences and congresses:

1. Sañudo-Fontaneda, L.A.; Charlesworth, S.; Castro-Fresno, D.; Andrés-Valeri, V.C.A.; and Rodríguez-Hernandez, J. 'Experimental pervious pavement parking areas in the north of Spain'. 8th International Conference NOVATECH. Planning & technologies for sustainable urban water management. Lyon, France. Oral presentation.
2. Coupe, S.J.; Sañudo-Fontaneda, L.A.; Nnadi, E.O.; Charlesworth, S.M.;

- Rodriguez-Hernandez, J.; and Oyelola, O. 'New Developments in Permeable Pavement Design to Improve Water Quantity and Quality'. 8th International Conference NOVATECH. Planning & technologies for sustainable urban water management. Lyon, France. Póster.
3. Sañudo-Fontaneda, L.A.; Castro-Fresno, D.; Rodriguez-Hernandez, J.; and Vega-Zamanillo, A. 'Laboratory study of the infiltration performance of three surfacing materials used on permeable pavements'. SUDSnet International Conference - Multiple benefits from surface water management, Coventry, United Kingdom. Oral presentation.
  4. Sañudo Fontaneda, L.A.; Castro Fresno, D.; and Rodriguez Hernandez, J. 'Investigación y desarrollo de firmes permeables para la mitigación de inundaciones y la "Valorización Energética del Agua de Lluvia (VEA)". VI Congreso Nacional de la Ingeniería Civil. Retos de la Ingeniería Civil. Valencia, Spain. Abstract reading.
  5. Sañudo-Fontaneda, L.A.; Castro-Fresno, D.; Rodriguez-Hernandez, J.; Borinaga-Treviño, R. 'Comparison of the infiltration capacity of permeable surfaces for Rainwater Energy Valorization'. 12th International Conference on Urban Drainage (ICUD). Porto Alegre (Rio Grande do Sul), Brazil. Oral presentation.
  6. Sañudo-Fontaneda, L.A.; Castro-Fresno, D.; Rodriguez-Hernandez, J.; and Ballester-Muñoz, F. 'Rainwater Energy Valorization through the Use of Permeable Pavements in Urban Areas'. 37th IAHS World Congress on Housing Science. Design, Technology, Refurbishment and Management of Buildings. Santander, Spain. Oral presentation.

Lecturing activity regarding the methodology of the thesis:

1. **Sustainability in Construction.** Subject within the 4th Course of Civil Engineering. University of Cantabria. Lesson based on permeable pavements within the block called "Low Impact Development (LID)".
2. **Design and construction of Sustainable Urban Drainage Systems (SUDS).** Subject of free election for engineering students. University of Cantabria. Field visit to "Las Llamas" car park.
3. **Sustainable Urban Drainage Systems (SUDS).** Summer course. University of Cantabria. Lesson based on permeable pavements in SUDS.





## REFERENCIAS



- Ref. 1. Abbot, J., Davies, P., Simkins, P., Morgan, C., Levin, D., and Robinson, P. (2013). "Creating water sensitive places – scoping the potential for Water Sensitive Urban Design in the UK." London, CIRIA: C 724. ISBN 978-0-86022-733-3.
- Ref. 2. Acioli, L. A., da Silveira, A. L. L., and Goldenfun, J. A. (2005). "Experimental study of permeable reservoir pavements for surface runoff control at source." *10th International Conference on Urban Drainage*, 10th International Conference on Urban Drainage, 21-26 August 2005, Copenhagen, Denmark.
- Ref. 3. Aguado, A., Josa, A., and 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).
- Ref. 4. Al-Rubaei, A. M., Stenglein, A. L., Viklander, M., and Blecken, G. T. (2013). "Long-Term hydraulic performance of porous asphalt pavements in Northern Sweden." *Journal of Irrigation and Drainage Engineering (ASCE)*, 139(6), 499-505.
- Ref. 5. Andersen, C. T., Foster, I. D. L., and Pratt, C. J. (1999). "The role of urban surfaces (permeable pavements) in regulating drainage and evaporation: Development of a laboratory simulation experiment." *Hydrological Processes*, 13(4), 597-609.
- Ref. 6. Ando, A. W., and Freitas, L. P. C. (2011). "Consumer demand for green stormwater management technology in an urban setting: The case of Chicago rain barrels." *Water Resources Research*, 47(12), article number W12501.
- Ref. 7. Asaeda, T., Ca, V. T., and Wake, A. (1996). "Heat storage of pavement and its effect on the lower atmosphere." *Atmospheric Environment*, 30(3), 413-427.
- Ref. 8. Backhaus, A., and Fryd, O. (2013). "The aesthetic performance of urban landscape-based stormwater management systems: A review of twenty projects in Northern Europe." *Journal of Landscape Architecture*, 8(2), 52-63.
- Ref. 9. Barredo, J. I. (2007). "Major flood disasters in Europe: 1950-2005." *Natural Hazards*, 42(1), 125-148.
- Ref. 10. Bean, E. Z., Hunt, W. F., and Bidelsbach, D. A. (2007a). "Evaluation of four permeable pavement sites in eastern North Carolina for runoff reduction and water quality impacts." *Journal of Irrigation and Drainage Engineering (ASCE)*, 133(6), 583-592.
- Ref. 11. Bean, E. Z., Hunt, W. F., and Bidelsbach, D. A. (2007b). "Field survey of permeable pavement surface infiltration rates." *Journal of Irrigation and Drainage Engineering (ASCE)*, 133(3), 249-255.
- Ref. 12. Bean, E. Z., Hunt, W. F., and Bidelsbach, D. A. (2004). "Study on the surface infiltration rate of permeable pavements." *2004 World Water and Environmental Resources Congress: Critical Transitions in Water and Environmental Resources Management*, 749-758. June 27-July 1. Salt Lake City, United States.
- Ref. 13. Benedetto, A., and Pensa, S. (2007). "Indirect diagnosis of pavement structural damages using surface GPR reflection techniques." *Journal of Applied Geophysics*, 62(2), 107-123.
- Ref. 14. Bisquerra, R. (1987). "Introducción a la Estadística aplicada a la investigación educativa. Un enfoque informático con los paquetes BMDP y SPSSX." Barcelona, Spain. PPU. ISBN: 84-7665-068-X.

- 
- Ref. 15. Boogaard, F., Lucke, T., and Beecham, S. (2014). "Effect of age of permeable pavements on their infiltration function." *Clean Soil Air Water*, 42(2), 146-152.
- Ref. 16. Brattebo, B. O., and Booth, D. B. (2003). "Long-term stormwater quantity and quality performance of permeable pavement systems." *Water Research*, 37 4369-4376.
- Ref. 17. Breinco blue future (2014). "Web de la empresa" <http://www.breincobluefuture.com/es> (Abril/4, 2014).
- Ref. 18. Brown, R. A., Line, D. E., Hunt, W. F., and Lord, W. G. (2010). "Comparison of low impact development treatment, traditional stormwater treatment, and no stormwater treatment for commercial shopping centers in North Carolina." *2010 International Low Impact Development Conference - Redefining Water in the City*, 692-701. April 11-14, San Francisco, United States.
- Ref. 19. Bustos, G., and Pérez, E. (2007). "Pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes." PG-3. 5ª Edición. Colección normativa técnica. ISBN 13: 978-84-95596-88-8.
- Ref. 20. Campos-Aranda, D. F. (2010). "Rainfall Maximum Intensities for Urban Hydrological Design in Mexican Republic." 11(2), 179-188.
- Ref. 21. Carreteros. (2008). "O.C. 24/2008. Artículo 543. Mezclas bituminosas para capas de rodadura. Mezclas drenantes y discontinuas." [http://www.carreteros.org/normativa/pg3/articulos/5/iv/a\\_543d.htm](http://www.carreteros.org/normativa/pg3/articulos/5/iv/a_543d.htm) (Abril/15, 2014).
- Ref. 22. Casas Castillo, C. M. (2005). "Análisis especial y temporal de las lluvias extremas en Catalunya. Modelización y clasificación objetiva." Universitat de Barcelona, Barcelona (España).
- Ref. 23. Castro Fresno, D., Bayón, J. R., Rodríguez, J., and Ballester Muñoz, F. (2005). "Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS)." *Interciencia* 30(5), 255-260.
- Ref. 24. Castro Fresno, D., González-Angulo, N., Rodríguez, J., and Calzada, M. A. (2007). "The influence of paving-blok shape on the infiltration capacity of permeable paving." *Land Contamination & Reclamation*, 15(3), 335-344.
- Ref. 25. Castro-Fresno, D., Andrés-Valeri, V. C., Sañudo-Fontaneda, L. A., and Rodriguez-Hernandez, J. (2013). "Sustainable drainage practices in Spain, specially focused on pervious pavements." *Water*, 5(1), 67-93.
- Ref. 26. Charbeneau, R. J., Klenzendorf, J. B., and Barrett, M. E. (2010). "Methodology for determining laboratory and in situ hydraulic conductivity of asphalt permeable friction course." *Journal of Hydraulic Engineering*, 137(1), 15-22.
- Ref. 27. Chopra, M., Kakuturu, S., Ballock, C., Spence, J., and Wanielista, M. (2010). "Effect of rejuvenation methods on the infiltration rates of pervious concrete pavements." *Journal of Hydrological Engineering*, 15(6), 426-433.
- Ref. 28. Christensen, J. H., and Christensen, O. B. (2003). "Severe summertime flooding in Europe." *Nature*, 421(6925), 805-806.
- Ref. 29. Colandini, V., Legret, M., Brosseaud, Y., and Balades, J. -. (1995). "Metallic pollution in clogging materials of urban porous pavements." *Water Science and Technology*, 32(1), 57-62.
- Ref. 30. Collins, K. A., Hunt, W. F., and Hathaway, J. M. (2008a). "Evaluation of various types of permeable pavement with respect to water quality improvement and

- flood control." *2nd National Low Impact Development Conference 2007: New and Continuing Applications*, 275-289. March 12-14. Wilmington, United States.
- Ref. 31. Collins, K. A., Hunt, W. F., and Hathaway, J. M. (2008b). "Hydrologic comparison of four types of permeable pavement and standard asphalt in Eastern North Carolina." *Journal of Hydrologic Engineering*, 13(12), 1146-1157.
- Ref. 32. Collins, K. A., Hunt, W. F., and Hathaway, J. M. (2006). "Evaluation of various types of permeable pavements with respect to water quality improvement and flood control." *8th International Conference on Concrete Block Paving*, 129-139. November 6-8, San Francisco, United States.
- Ref. 33. Coupe, S. J., Newman, A. P., Davies, J. W., and Robinson, K. (2006). "Permeable pavements for water recycling and reuse: initial results and future prospects." *8th International Conference on Concrete Block Paving*, 93-102. November 6-8, San Francisco, United States.
- Ref. 34. Coupe, S. J., Smith, H. G., Newman, A. P., and Puehmeier, T. (2003). "Biodegradation and microbial diversity within permeable pavements." *European Journal of Protistology*, 39(4), 495-498.
- Ref. 35. Cué Pérez, G., Revilla Cortezón, J. A., Álvarez Díaz, C., and García Alonso, E. (2006). "Cálculo de caudales de avenida en la cuenca del río Pas (Cantabria)." *III Congreso de Ingeniería Civil, Territorio y Medio Ambiente. Agua, biodiversidad e Ingeniería. 25-27 de Octubre*. Zaragoza, España.
- Ref. 36. Dahlenburg, J., and Birtles, P. (2012). "All roads lead to WSUD: Exploring the biodiversity, human health and social benefits of WSUD." *7th International Conference on Water Sensitive Urban Design, WSUD 2012, 21-23 February, Melbourne (Australia)*.
- Ref. 37. Damodaram, C., Giacomoni, M. H., Prakash Khedun, C., Holmes, H., Ryan, A., Saour, W., and Zechman, E. M. (2010). "Simulation of combined best management practices and low impact development for sustainable stormwater management." *Journal of American Water Resources Association*, 46(5), 907-918.
- Ref. 38. DANOSA (2013). <http://portal.danosa.com/danosa/CMSServlet?node=710421> Consultada el 6 de Noviembre.
- Ref. 39. Dauphiné, A., and Provitolo, D. (2007). "Resilience: A concept for risk management." *Ann. Geogr.*, 116(654), 115-125.
- Ref. 40. Davies, J. W., Pratt, C. J., and Scott, M. A. (2002). "Laboratory study of permeable pavement system to support hydraulic modelling." *Proceedings of the 9th International Conference on Urban Drainage (9ICUD)*. September 8-13. Portland, United States. ISBN: 0784406448.
- Ref. 41. Davis, A. P. (2005). "Green engineering principles promote low-impact development." *Environmental Science and Technology*, 39(16), 338A-344A.
- Ref. 42. Delatte, N., Mrkajic, A., and Miller, D. I. (2009). "Field and laboratory evaluation of pervious concrete pavements." *Transportation Research Record*, (2113), 132-139.
- Ref. 43. Dietz, M. E. (2007). "Low impact development practices: A review of current research and recommendations for future directions." *Water Air Soil Pollution*, 186(1-4), 351-363.

- 
- Ref. 44. Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 23 de octubre de 2000 por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas.
- Ref. 45. Directiva 2007/60/EC del Parlamento Europeo y del Consejo de 26 de Noviembre 2007 por la que se establece la evaluación y la gestión de los riesgos de inundación.
- Ref. 46. Dougherty, M., Hein, M., Martina, B. A., and Ferguson, B. K. (2011). "Quick surface infiltration test to assess maintenance needs on small pervious concrete sites." *Journal Irrigation Drainage Engineering*, 137(8), 553-563.
- Ref. 47. Duffy, A., Jefferies, C., Waddell, G., Shanks, G., Blackwood, D., and Watkins, A. (2008). "A cost comparison of traditional drainage and SUDS in Scotland." *Water Science Technology*, 57(9), 1451-1459.
- Ref. 48. Earles, T. A., Keyes, J., and Claffey Jr., M. (2008). "Monitoring of pervious pavement/infiltration bed system in Aurora, Colorado." *World Environmental and Water Resources Congress 2008*. May 12-16, Honolulu, Hawaii.
- Ref. 49. ECOCRETO. (2011). "Ficha técnica del concreto permeable base cemento con aditivo ECOCRETO®." <http://www.ecocreto.com.mx/pdf/Ftecnica1.pdf> (Abril/15, 2014).
- Ref. 50. Eigenbrod, F., Bell, V. A., Davies, H. N., Heinemeyer, A., Armsworth, P. R., and Gaston, K. J. (2011). "The impact of projected increases in urbanization on ecosystem services." *Proceeding of the Royal Society B: Biological Sciences*, 278(1722), 3201-3208.
- Ref. 51. Ellis, J. B., Deutsch, J. -, Mouchel, J. -, Scholes, L., and Revitt, M. D. (2004). "Multicriteria decision approaches to support sustainable drainage options for the treatment of highway and urban runoff." *Science of the Total Environment*, 334-335, 251-260.
- Ref. 52. Ellis, J. B., and Revitt, D. M. (2010). "The management of urban surface water drainage in England and Wales." *Water and Environment Journal*, 24(1), 1-8.
- Ref. 53. Eroksuz, E., and Rahman, A. (2010). "Rainwater tanks in multi-unit buildings: A case study for three Australian cities." *Resources Conservation and Recycling*, 54(12), 1449-1452.
- Ref. 54. European Standard EN 12390-2 (2009), Testing hardened concrete - Part 2: Making and curing specimens for strength tests, European Committee for Standardization, Brussels.
- Ref. 55. European Standard EN 12390-3 (2009), Testing hardened concrete - Part 3: Compressive strength of test specimens, European Committee for Standardization, Brussels.
- Ref. 56. European Standard EN 12390-1 (2012), Testing hardened concrete - Part 1: Shape, dimensions and other requirements for specimens and moulds, European Committee for Standardization, Brussels.
- Ref. 57. European Standard EN 933-1 (2012). Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 1: Determinación de la granulometría de las partículas. Método del tamizado. Madrid. AENOR.
- Ref. 58. European Standard EN 12697-40 (2013), Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 40: In situ drainability, European Committee for Standardization, Brussels.
-

- Ref. 59. Faram, M. G., Ashley, R. M., Chatfield, P. R., and Andoh, R. Y. G. (2010). "Appropriate drainage systems for a changing climate." *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Engineering Sustainability*, 163(2), 107-116.
- Ref. 60. Fassman, E. A., and Blackbourn, S. (2010). "Permeable pavement performance over 3 years of monitoring." *2010 International Low Impact Development Conference - Redefining Water in the City*, 152-165. April 11-14. San Francisco, United States.
- Ref. 61. 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.
- Ref. 62. Ferguson, B. K. (2006). "Porous pavements: the making of progress in technology and design." *8th International Conference on Concrete Block Paving*. 11-16. November 6-8, San Francisco, United States.
- Ref. 63. Fernandez-Barrera, A. H. (2010). "Desarrollo de un sistema de tratamiento del agua de escorrentía superficial procedente de aparcamientos impermeables usando flujo ascendente y geotextiles." Universidad de Cantabria, España.
- Ref. 64. Fernández-Barrera, A. H., Castro-Fresno, D., Rodríguez-Hernández, J., and Calzada-Pérez, M. A. (2008). "Infiltration capacity assessment of urban pavements using the LCS permeameter and the CP infiltrometer." *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 134(5), 659-665.
- Ref. 65. Fewtrell, L., and Kay, D. (2008). "An attempt to quantify the health impacts of flooding in the UK using an urban case study." *Public Health*, 122(5), 446-451.
- Ref. 66. Forsberg, A. A., McCuskey, J. A., and Waltman, C. S. (2005). "University of Wisconsin-Green Bay Stormwater Management: Regulations and Best Management Practices." *Environmental Science and Policy* 763.
- Ref. 67. Fox, D. M., Witz, E., Blanc, V., Soulié, C., Penalver-Navarro, M., and Dervieux, A. (2012). "A case study of land cover change (1950-2003) and runoff in a Mediterranean catchment." *Applied Geography*, 32(2), 810-821.
- Ref. 68. Gilbert, J. K., and Clausen, J. C. (2006). "Stormwater runoff quality and quantity from asphalt, paver, and crushed stone driveways in Connecticut." *Water Research*, 40(4), 826-832.
- Ref. 69. Gomez-Ullate Fuente, E. (2011). "Estudio de un aparcamiento de firmes filtrantes para la mejora de la gestión sostenible de las aguas urbanas mediante el almacenamiento y valorización del agua de lluvia." Universidad de Cantabria.
- Ref. 70. Gomez-Ullate, E., Bayon, J. R., Coupe, S., and Castro-Fresno, D. (2010a). "Performance of pervious pavement parking bays storing rainwater in the north of Spain." *Water Science and Technology*, 62 (3), 615-621.
- Ref. 71. Gomez-Ullate, E., Castillo-Lopez, E., Castro-Fresno, D., and Bayon, J. R. (2010b). "Analysis and Contrast of Different Pervious Pavements for Management of Storm-Water in a Parking Area in Northern Spain." *Water Resources Management*, 25(6), 1525-1535.
- Ref. 72. González-Angullo, N., Castro, D., Rodríguez-Hernández, J., and Davies, J. W. (2008). "Runoff infiltration to permeable paving in clogged conditions." *Urban Water Journal*, 5(2), 117-124.
- Ref. 73. Hamzah, M. O., Jaafar, Z. F. M., and Ahmad, F. (2013). "Laboratory simulation of porous asphalt parking lot system and mix design for storm water management." *Journal of Engineering and Science Technology*, 8(2), 217-232.

- 
- Ref. 74. Hamzah, M. O., Jaafar, Z. F. M., and Ahmad, F. (2012). "Laboratory assessment of water flow simulator for porous parking lots system." *World Applied Science Journal*, 16(5), 748-758.
- Ref. 75. Haselbach, L., Boyer, M., Kevern, J. T., and Schaefer, V. R. (2011). "Cyclic heat island impacts on traditional versus pervious concrete pavement systems." *Transportation Research Record*, (2240), 107-115.
- Ref. 76. Haselbach, L. M., Valavala, S., and Montes, F. (2006). "Permeability predictions for sand-clogged Portland cement pervious concrete pavement systems." *Journal of Environmental Management*, 81(1), 42-49.
- Ref. 77. Hassani, A., Mohammad, S., and Ghoddusi, P. (2010). "Runoff infiltration through permeable block pavements." *Proceedings of the Institution of Civil Engineer: Transport*, 163(4), 183-190.
- Ref. 78. Hatt, B. E., Fletcher, T. D., Walsh, C. J., and Taylor, S. L. (2004). "The influence of urban density and drainage infrastructure on the concentrations and loads of pollutants in small streams." *Environmental Management*, 34(1), 112-124.
- Ref. 79. Henderson, V., Tighe, S. L., and Norris, J. (2009). "Pervious concrete pavement: Integrated laboratory and field study." *Transportation Research Record*, (2113), 13-21.
- Ref. 80. Houle, K. M., Roseen, R. M., Ballesteros, T. P., Briggs, J. F., and Houle, J. J. (2009). "Examinations of pervious concrete and porous asphalt pavements performance for stormwater management in Northern climates." *World Environmental and Water Resources Congress 2009: Great Rivers*, 342, 1105-1122.
- Ref. 81. Huang, X., Tan, H., Zhou, J., Yang, T., Benjamin, A., Wen, S. W., Li, S., Liu, A., Li, X., Fen, S., and Li, X. (2008). "Flood hazard in Hunan province of China: An economic loss analysis." *Natural Hazards*, 47(1), 65-73.
- Ref. 82. Huitema, D., Mostert, E., Egas, W., Moellenkamp, S., Pahl-Wostl, C., and Yalcin, R. (2009). "Adaptive water governance: Assessing the institutional prescriptions of adaptive (co-)management from a governance perspective and defining a research agenda." *Ecology and Society*, 14(1).
- Ref. 83. Hunt, W. F., and Collins, K. A. (2008). "Permeable Pavement: Research Update and Design Implications." *Urban Waterways. North Carolina Cooperative Extension Services*. NC State University. AGW-588-14. E08-503 27.
- Ref. 84. Illgen, M., Harting, K., Schmitt, T. G., and Welker, A. (2007). "Runoff and infiltration characteristics of pavement structures-review of an extensive monitoring program." *Water Science and Technology*, 56(10), 133-140.
- Ref. 85. Imran, H. M., Akib, S., and Karim, M. R. (2013). "Permeable pavement and stormwater management systems: a review." *Environmental Technology*, 34(18), 2649-2656.
- Ref. 86. INSIVUMEH. (2014). "Estudio de lluvia maxima diaria en la República de Guatemala." [http://www.infoiarna.org.gt/guateagua/subtemas/7/Rec\\_hid/ESTUDIO%20%20DE%20LLUVIA%20MAXIMA%20EN%20GUATE\\_OPT.pdf](http://www.infoiarna.org.gt/guateagua/subtemas/7/Rec_hid/ESTUDIO%20%20DE%20LLUVIA%20MAXIMA%20EN%20GUATE_OPT.pdf) (Abril/20, 2014).
- Ref. 87. Jayasuriya, L. N. N., Kadurupokune, N., Othman, M., and Jesse, K. (2007a). "Contributing to the sustainable use of stormwater: The role of pervious pavements." *Water Science and Technology*, 56(12), 69-75.
-



- Ref. 88. Jayasuriya, N., Kadurupokune, N., Othman, M., and Jesse, K. (2007b). "Managing Stormwater Productively Using Pervious Pavements." NOVATECH 2007. Sixth International Conference on Sustainable Drainage Techniques and Strategies in Urban Water Management. June 25-28, Lyon, France.
- Ref. 89. Jiménez Gallardo, B. R. (1999). *Contaminación por Escorrentía Urbana*. Madrid: Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos; Colección SEINOR No. 22; ISBN: 84-380-0157-2.
- Ref. 90. Jung, D., and Kim, Y. (2012). "Evaluation of the infiltration capacity of a permeable paving block for urban flood disaster reduction." *World Environmental and Water Resources Congress 2012: Crossing Boundaries*, 3583-3593.
- Ref. 91. Junier, S. J., and Mostert, E. (2012). "The implementation of the Water Framework Directive in The Netherlands: Does it promote integrated management?" *Physics and Chemistry of the Earth*, 47-48, 2-10.
- Ref. 92. Kabbes, K. C., and Windhager, S. (2010). "Sustainable site initiative - Protecting and restoring site ecosystem services." *World Environmental and Water Resources Congress 2010: Challenges of Change*, 4086-4092.
- Ref. 93. Kadurupokune, N., and Jayasuriya, N. (2009). "Pollutant load removal efficiency of pervious pavements: is clogging an issue?" *Water Science and Technology*, 60(7), 1787-1794.
- Ref. 94. Karamouz, M., Hosseinpour, A., and Nazif, S. (2011). "Improvement of urban drainage system performance under climate change impact: Case study." *Journal of Hydrologic Engineering*, 16(5), 395-412.
- Ref. 95. Klute, A. (1986). *Methods of soil analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Methods*. American Society of Agronomy, Madison (Estados Unidos). ISBN: 978-0-89118-864-3.
- Ref. 96. Kolsky, P. (1998). *Storm Drainage. An enegineering guide to the low cost evaluation of system performance*. Intermediate Technology Publications, London, United Kingdom. ISBN 978-1853394324.
- Ref. 97. Kwiatkowski, M., Welker, A. L., Traver, R. G., Vanacore, M., and Ladd, T. (2007). "Evaluation of an infiltration best management practice utilizing pervious concrete." *Journal of American Water Resources Association*, 43(5), 1208-1222.
- Ref. 98. 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).
- Ref. 99. Li, H., Kayhanian, M., and Harvey, J. T. (2013). "Comparative field permeability measurement of permeable pavements using ASTM C1701 and NCAT permeameter methods." *Journal of Environmental Management*, 118 144-152.
- Ref. 100. Liao, Z. L., He, Y., Huang, F., Wang, S., and Li, H. Z. (2013). "Analysis on LID for highly urbanized areas waterlogging control: Demonstrated on the example of Caohejing in Shanghai." *Water Science and Technology*, 68(12), 2559-2567.
- Ref. 101. Lin, J. -, Hsu, C. -, and Su, Y. -. (2013). "Field assessment in permeability and surface run-off of permeable pavement." *Applied Mechanics and Materials*, 361-363, 1503-1506.
- Ref. 102. Livada, I., Santamouris, M., Niachou, K., Papanikolaou, N., and Mihalakakou, G. (2002). "Determination of places in the great Athens area where the heat island effect is observed." *Theoretical and Applied Climatology*, 71(3-4), 219-230.

- 
- Ref. 103. Lowe, T. R. (2006). (Coventry University), "Paving system", WO2006077421A1, 27 de Julio de 2006.
- Ref. 104. Lucke, T., and Beecham, S. (2011a). "Field investigation of clogging in a permeable pavement system." *Building Research and Information*, 39(6), 603-615.
- Ref. 105. Lucke, T., and Beecham, S. (2011b). "Sediment blockage testing of permeable pavements." *34th World Congress of the International Association for Hydro-Environment Engineering and Research (IAHR)*. June 26- July 1, Brisbane (Australia).
- Ref. 106. Martin, C., Ruperd, Y., and Legret, M. (2006). "Urban stormwater drainage management: The development of a multicriteria decision aid approach for best management practices." *European Journal of Operational Research*, 181(1), 338-349.
- Ref. 107. McBride, C., and Knapton, J. (2006). "The design of permeable pavements for retail development in Ireland." *8th International Conference on Concrete Block Paving* 83-92, November 6-8. San Francisco, United States.
- Ref. 108. Ministerio de Fomento. Dirección General de Carreteras. (2011). "Guía para la actualización del inventario de firmes de la Red de Carreteras del Estado." Catálogo general de publicaciones oficiales del Ministerio de Fomento. Gobierno de España. 1ª Edición. NIPO papel: 161-11-114-7.
- Ref. 109. Montes, F., and Haselbach, L. (2006). "Measuring hydraulic conductivity in pervious concrete." *Environmental Engineering Science*, 23(6), 960-969.
- Ref. 110. Morison, P. J., and Brown, R. R. (2011). "Understanding the nature of publics and local policy commitment to Water Sensitive Urban Design." *Landscape and Urban Planning*, 99(2), 83-92.
- Ref. 111. Naqvi, M. (2003). "Design of linear drainage systems." Thomas Telford, London, United Kingdom. ISBN 978-0-7277-3222-4.
- Ref. 112. Newcomer, M. E., Gurdak, J. J., Sklar, L. S., and Nanus, L. (2014). "Urban recharge beneath low impact development and effects of climate variability and change." *Water Resources Research*, 50. Article in press. DOI: 10.1002/2013WR014282.
- Ref. 113. Newman, A. P., Pratt, C. J., Coupe, S. J., and Cresswell, N. (2002). "Oil biodegradation in permeable pavements by microbial communities." *Water Science and Technology*, 45(7), 51-56.
- Ref. 114. NLT-327/00 (2000). Permeabilidad in situ de pavimentos drenantes con el permeámetro LCS. Madrid: Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX). Gabinete de Formación y Documentación.
- Ref. 115. Nnadi, E. O. (2009). "An Evaluation of Modified Pervious Pavements for Water Harvesting for Irrigation." Tesis Doctoral. School of Engineering & Computing, Coventry University, United Kingdom.
- Ref. 116. Nnadi, E. O., Coupe, S. J., Sañudo-Fontaneda, L. A., and Rodriguez-Hernandez, J. (2014a). "An evaluation of enhanced geotextile layer in permeable pavement to improve stormwater infiltration and attenuation." *International Journal of Pavement Engineering*. Article in press. DOI: 10.1080/10298436.2014.893325.
- Ref. 117. Nnadi, E. O., Newman, A. P., and Coupe, S. J. (2014b). "Geotextile incorporated permeable pavement system as potential source of irrigation water: Effects of

- re-used water on the soil, plant growth and development." *Clean Soil Air Water*, 42(2), 125-132.
- Ref. 118. Nnadi, E. O., Newman, A. P., Duckers, L., Coupe, S. J., and Charlesworth, S. (2012). "Design and Validation of a Test Rig to Simulate High Rainfall Events for Infiltration Studies of Permeable Pavement Systems." *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 138(6), 553-557.
- Ref. 119. NOAA. (2014). "Precipitation-Frequency Data Service [on-line]." <http://hdsc.nws.noaa.gov/hdsc/pfds/index.html> (Abril/20, 2014).
- Ref. 120. Ogden, C. B., Van Es, H. M., and Schindelbeck, R. R. (1997). "Miniature rain simulator for field measurement of soil infiltration." *Soil Science Society America Journal*, 61(4), 1041-1043.
- Ref. 121. Oyebande, L. (1982). "Deriving rainfall intensity-duration-frequency relationships and estimates for regions with inadequate data." *Hydrological Sciences Journal* 27(3), 353-367.
- Ref. 122. Pandit, A., and Heck, H. H. (2009). "Estimations of soil conservation service curve numbers for concrete and asphalt." *Journal of Hydrologic Engineering*, 14(4), 335-345.
- Ref. 123. Pappas, E., and Huang, C. -. (2010). "Runoff and infiltration dynamics on pervious paver surfaces." *Watershed Management Conference 2010: Innovations in Watershed Management under Land Use and Climate Change*, 767-773. August 23-27, Madison, United States.
- Ref. 124. Pérez Jiménez, F.E., Calzada Pérez, M.A. (1990). "Analysis and Evaluation of the Performance of Porous Asphalt: The Spanish Experience." Surface characteristics of roadways: international research and technologies, Papers of the First International Symposium on Surface Characteristics, Pennsylvania, Unites States of America, June 8-9, 1988. Meyer/Reichert, editors. ASTM STP 1031.
- Ref. 125. Pindado, M. Á., Aguado, A., and Josa, A. (1999). "Fatigue behavior of polymer-modified porous concretes." *Cement and Concrete Research*, 29(7), 1077-1083.
- Ref. 126. Pinho, P., Bergamini, A., Carvalho, P., Branquinho, C., Stofer, S., Scheidegger, C., and Máguas, C. (2012). "Lichen functional groups as ecological indicators of the effects of land-use in Mediterranean ecosystems." *Ecological Indicators*, 15(1), 36-42.
- Ref. 127. Pratt, C., Wilson, S., and Cooper, P. (2002). "Source control using constructed pervious surfaces. Hydraulic, structural and water quality performance issues." London, CIRIA: C582, RP637. ISBN 978 0 86017 582 7.
- Ref. 128. Pratt, C. J., Mantle, J. D. G., and 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*, 32(1), 63-69.
- Ref. 129. Prince George's County. (1999). "Low-Impact Development Strategies. An Integrated Design Approach. Department of Environmental Resources." Department of Environmental Resources. Programs and Planning Division, Maryland.
- Ref. 130. Qin, H. -, Li, Z. -, and Fu, G. (2013). "The effects of low impact development on urban flooding under different rainfall characteristics." *Journal of Environmental Management*, 129, 577-585.

- Ref. 131. Rodríguez Bayon, J. (2008). "Análisis de los aspectos de depuración y degradación de los hidrocarburos presentes en las aguas procedentes de la escorrentía urbana, en los firmes permeables." Tesis Doctoral. Universidad de Cantabria, España.
- Ref. 132. Rodríguez, J., Castro, D., Calzada, M. A., and Davies, J. W. (2005). "Pervious pavement research in Spain: Structural and hydraulic issues." *10th International Conference on Urban Drainage, August 21-26, Copenhagen, Denmark*.
- Ref. 133. Rodríguez-Hernandez, J., Castro-Fresno, D., Fernández-Barrera, A. H., and Vega-Zamanillo, Á. (2012). "Characterization of Infiltration Capacity of Permeable Pavements with Porous Asphalt Surface Using Cantabrian Fixed Infiltrometer." *Journal of Hydrolic Engineering*, 17(5), 597-603.
- Ref. 134. Rodríguez-Hernandez, 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." Universidad de Cantabria, España.
- Ref. 135. Rostagno, C. M. (1989). "Infiltration and sediment production as affected by soil surface conditions in a shrubland of Patagonia, Argentina." *Journal of Range Management*, 42(5), 382-385.
- Ref. 136. Rowe, A. A., Borst, M., O'Connor, T. P., and Stander, E. K. (2009). "Pervious pavement system evaluation." *World Environmental and Water Resources Congress 2009: Great Rivers*, 1440-1447. May 17-21. Kansas City, United states.
- Ref. 137. Roy, A. H., Wenger, S. J., Fletcher, T. D., Walsh, C. J., Ladson, A. R., Shuster, W. D., Thurston, H. W., and Brown, R. R. (2008). "Impediments and solutions to sustainable, watershed-scale urban stormwater management: Lessons from Australia and the United States." *Environmental Management*, 42(2), 344-359.
- Ref. 138. Rushton, B. T. (2001). "Low-impact parking lot design reduces runoff and pollutant loads." *Journal of Water Resources Planning and Management*, 127(3), 172-179.
- Ref. 139. Sansalone, J., Kuang, X., and Ranieri, V. (2008). "Permeable pavement as a hydraulic and filtration interface for urban drainage." *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 134(5), 666-674.
- Ref. 140. Santamouris, M. (2013). "Using cool pavements as a mitigation strategy to fight urban heat island - A review of the actual developments." *Renewable Sustainable Energy Rev*, 26 224-240.
- Ref. 141. Sañudo-Fontaneda, L. A., Castro-Fresno, D., Rodríguez-Hernandez, J., and Ballester Muñoz, F. (2010). "Rainwater Energy Valorization through the Use of Permeable Pavements in Urban Areas." *XXXVII IAHS World Congress on Housing. October 26-29 Santander, España*.
- Ref. 142. Sañudo-Fontaneda, L. A., Andrés-Valeri, V. C. A., Rodríguez-Hernandez, J., and Castro-Fresno, D. (2014a). "Field study of the reduction of the infiltration capacity of porous mixtures surfaces." *Water* 6(3), 661-669.
- Ref. 143. Sañudo-Fontaneda, L. A., Rodríguez-Hernandez, J., Calzada-Pérez, M. A., and Castro-Fresno, D. (2014b). "Infiltration behaviour of polymer-modified porous concrete and porous asphalt surfaces used in SuDS techniques." *Clean Soil Air Water*, 42(2), 139-145.

- Ref. 144. Sañudo-Fontaneda, L. A., Rodriguez-Hernandez, J., Vega-Zamanillo, A., and Castro-Fresno, D. (2013). "Laboratory analysis of the infiltration capacity of interlocking concrete block pavements in car parks." *Water Science and Technology*, 67(3), 675-681.
- Ref. 145. Schlüter, W., and Jefferies, C. (2002). "Modelling the outflow from a porous pavement." *Urban Water*, 4(3), 245-253.
- Ref. 146. Scholz, M. (2013). "Water quality improvement performance of geotextiles within permeable pavement systems: A critical review." *Water*, 5(2), 462-479.
- Ref. 147. Scholz, M., and Grabowiecki, P. (2009). "Combined permeable pavement and ground source heat pump systems to treat urban runoff." *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 84(3), 405-413.
- Ref. 148. Scholz, M., and Grabowiecki, P. (2007). "Review of permeable pavement systems." *Building and Environment*, 42(11), 3830-3836.
- Ref. 149. Shapiro, N., and Valentine, B. (2010). "Green street retrofit in an urban transportation infrastructure." *Green Streets Highw.: Interact. Conf. State Art how Achieve Sustainable Outcomes - Proc. Green Streets Highw. Conf.*, 389 190-200.
- Ref. 150. Shu, X., Huang, B., Wu, H., Dong, Q., and Burdette, E. G. (2011). "Performance comparison of laboratory and field produced pervious concrete mixtures." *Construction and Building Materials*, 25(8), 3187-3192.
- Ref. 151. Shuster, W. D., Pappas, E., and Zhang, Y. (2008). "Laboratory-scale simulation of runoff response from pervious-impervious systems." *Journal of Hydrologic Engineering*, 13(9), 886-893.
- Ref. 152. Smart, P., and Herbertson, J. G. (1992). "*Drainage Design*." Blackie and Son Ltd, United States. ISBN 978-0442313340.
- Ref. 153. Smith, D. R., Earley, K., and Lia, J. M. (2012). "Potential application of ASTM C1701 for evaluating surface infiltration of permeable interlocking concrete pavements." *ASTM Special Technical Publication*, 1551 STP, 97-105.
- Ref. 154. Stovin, V. R., and Swan, A. D. (2007). "Retrofit SuDS-cost estimates and decision-support tools." *Proceedings of the Institution of Civil Engineering and Water Management*, 160(4), 207-214.
- Ref. 155. Suarez, P., Anderson, W., Mahal, V., and Lakshmanan, T. R. (2005). "Impacts of flooding and climate change on urban transportation: A systemwide performance assessment of the Boston Metro Area." *Transportation Reserarch Part D: Transport and Environment*, 10(3), 231-244.
- Ref. 156. Suriya, S., and Mudgal, B. V. (2012). "Impact of urbanization on flooding: The Thirusoolam sub watershed - A case study." *Journal of Hydrology*, 412-413, 210-219.
- Ref. 157. Sutton, S. (2010). "Creating better communities with LID." *2010 International Low Impact Development Conference - Redefining Water in the City*, 764-777. April 11-14, San Francisco, United States.
- Ref. 158. Swan, A. (2010). "How increased urbanisation has induced flooding problems in the UK: A lesson for African cities?" *Physics and Chemistry of the Earth*, 35(13-14), 643-647.
- Ref. 159. Swan, D. J., and Smith, D. R. (2010). "Development of design system for permeable interlocking concrete pavement." *Green Streets and Highways 2010*:

- An Interactive Conference on the State of the Art and How to Achieve Sustainable Outcomes*, 314-322. November 14-17, Denver, United States.
- Ref. 160. Tan, S. A., Fwa, T. F., and Guwe, V. Y. K. (2000). "Laboratory Measurements and Analysis of Clogging Mechanism of Porous Asphalt Mixes." *Journal of Testing and Evaluation*, 28(3), 207-216.
- Ref. 161. Taylor, A. C., and Fletcher, T. D. (2007). "Nonstructural urban stormwater quality measures: Building a knowledge base to improve their use." *Environmental Management*, 39(5), 663-677.
- Ref. 162. Temprano González, J., Gabriel Cervigni, M., Suárez López, J., and Tejero Monzón, J. I. (1996). "Contaminación en redes de alcantarillado urbano en tiempo de lluvia: control en origen." *Revista De Obras Públicas. Marzo. Nº 3352 Pp. 45-57*, 3352(Marzo. Nº 3352), 45-57.
- Ref. 163. Tota-Maharaj, K., Grabowiecki, P., and Scholz, M. (2009). "Energy and temperature performance analysis of geothermal (ground source) heat pumps integrated with permeable pavement systems for urban run-off reuse." *International Journal of Sustainable Engineering*, 2(3), 201-213.
- Ref. 164. Tota-Maharaj, K., Scholz, M., and Coupe, S. J. (2011). "Modelling temperature and energy balances within geothermal paving systems." *Road Materials and Pavement Design*, 12(2), 315-344.
- Ref. 165. UNESCO. (2008). "Rainfall Intensity Duration Frequency (IDF). Analysis for the Asia Pacific Region." *Rep. No. Report from IHP Regional Steering Committee for South East Asia and the Pacific.*, Trevor M. Daniell and Guillermo Q. Tabios III, .
- Ref. 166. United Nations. (2011). "World Urbanization Prospects. The 2011 Revision." Department of Economic and Social Affairs. Population Division. United Nations, New York.
- Ref. 167. Urrutiaguer, M., Lloyd, S., and Lamshed, S. (2010). "Determining water sensitive urban design project benefits using a multi-criteria assessment tool." *Water Science and Technology*, 61(9), 2333-2341.
- Ref. 168. US EPA. (2012a). "Aesthetics of Low Impact Development. LID Technologies Can Benefit Your Community's Visual Environment. LID Barrier Busters Fact Sheet Series." *Rep. No. EPA 841-N-12-003D*, Office of Water, EPA, Washington, DC.
- Ref. 169. US EPA. (2012b). "Terminology of Low Impact Development. Distinguishing LID from Other Techniques that Address Community Growth Issues. LID Barrier Busters Fact Sheet Series." *Rep. No. EPA 841-N-12-003B*, Office of Water, EPA, Washington, DC.
- Ref. 170. US EPA. (2000). "Low impact development—a literature review." *Rep. No. EPA-841-B-00-005*, Office of Water, EPA, Washington, DC.
- Ref. 171. Vita, M., Biscione, A., Bruno, F., Gerardi, M., and Lo Vecchio, G. (2009). "Long term planning of flood risks and processes of urbanistic development: The case of the Basilicata region (southern Italy)." *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 120, 953-962.
- Ref. 172. Wang, C. X. (2013). "Low impact development (LID) approaches in sustainable stormwater management." *Applied Mechanics and Materials*, 368-370(1), 297-301.

- Ref. 173. Wang, J., Zhao, X., Peng, S., and Wang, X. (2013). "Research on the runoff retention performance of a green roof for urban rainwater runoff control." *Journal of Food, Agriculture and Environment*, 11(3-4), 2429-2432.
- Ref. 174. Willems, P., Arnbjerg-Nielsen, K., Olsson, J., and Nguyen, V. T. V. (2011). "Climate change impact assessment on urban rainfall extremes and urban drainage: Methods and shortcomings." *Atmospheric Research*, 103, 106-118.
- Ref. 175. Wong, T. H. F., and Brown, R. R. (2009). "The water sensitive city: Principles for practice." *Water Science and Technology*, 60(3), 673-682.
- Ref. 176. Wright, G. B., Arthur, S., Bowles, G., Bastien, N., and Unwin, D. (2011). "Urban creep in Scotland: Stakeholder perceptions, quantification and cost implications of permeable solutions." *Water and Environment Journal*, 25(4), 513-521.
- Ref. 177. Zafra Mejía, C. A., González, J. T., and Monzón, I. T. (2011). "Heavy metal concentration and distribution (Pb, Zn, Cu, Cd and Cr) in urban road sediments." *Revista Facultad de Ingeniería*, (58), 53-62.





## ANEXOS



## **ANEXO 1. ENSAYOS DE MEDIDA DE LA CAPACIDAD DE INFILTRACIÓN DE UN PAVIMENTO PERMEABLE EN LABORATORIO**



## RESULTADOS

## PAVIMENTOS PERMEABLES CON SUPERFICIES DE ADOQUINES CON RANURAS

## □ Probeta N°1

Ensayo Nº1		Pendiente: 0%				Sin colmatar			
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes		
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)	
Fecha	10/06/2010	Infiltración	1	3920,1	1390,9	2529,2	2,529	24,36	24,36
			2	4829,3	1386,0	3443,3	3,443	33,16	57,51
			3	3605,9	1373,2	2232,7	2,233	21,50	79,02
			4	3324,8	1374,4	1950,4	1,950	18,78	97,80
			5	1596,8	1419,2	177,6	0,178	1,71	99,51
			Total	17276,9	6943,7	10333,2	10,333	99,51	
		Es. Sup.	Grande	580,4	529,3	51,1	0,051	0,49	100,00
		Total		17857,3	7473,0	10384,3	10,384	100,00	
	Infiltración en 10'		1531,2	206,3	517,4	3,0	99,42	0,58	
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.									
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15l/h.									

Ensayo N <sup>º</sup> 2		Pendiente: 3%				Sin colmatar			
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes		
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)	
Fecha	10/06/2010	Infiltración	1	2543,2	1390,9	1152,3	1,152	11,38	11,38
			2	4783,1	1386,0	3397,1	3,397	33,56	44,94
			3	3831,1	1373,2	2457,9	2,458	24,28	69,22
			4	2929,3	1374,4	1554,9	1,555	15,36	84,58
			5	2273,3	1419,2	854,1	0,854	8,44	93,02
			Total	16360,0	6943,7	9416,3	9,416	93,02	
		Es. Sup.	Grande	1235,7	529,3	706,4	0,706	6,98	100,00
		Total		17595,7	7473,0	10122,7	10,123	100,00	
	Infiltración en 10'		1510,9	186,0	533,2	18,8	96,59	3,41	
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.									
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15l/h.									

Ensayo N°3		Pendiente: 5%				Sin colmatar			
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes		
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)	
Fecha	Infiltración	1	2476,6	1390,9	1085,7	1,086	11,10	11,10	
10/06/2010		2	4267,3	1386,0	2881,3	2,881	29,45	40,55	
		3	3697,6	1373,2	2324,4	2,324	23,76	64,32	
		4	2826,3	1374,4	1451,9	1,452	14,84	79,16	
		5	2742,0	1419,2	1322,8	1,323	13,52	92,68	
		Total	16009,8	6943,7	9066,1	9,066	92,68		
		Es. Sup.	Grande	1245,3	529,3	716,0	0,716	7,32	100,00
		Total		17255,1	7473,0	9782,1	9,782	100,00	
		Infiltración en 10'		1324,9	0,0	514,4	0,0	100,00	0,00
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.									
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15l/h.									

Ensayo N <sup>º</sup> 4		Pendiente: 7%				Sin colmatar			
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes		
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)	
Fecha	Infiltración	1	1836,5	1390,9	445,6	0,446	3,99	3,99	
10/06/2010		2	4613,1	1386,0	3227,1	3,227	28,88	32,87	
		3	3632,6	1373,2	2259,4	2,259	20,22	53,10	
		4	3367,3	1374,4	1992,9	1,993	17,84	70,93	
		5	3497,5	1419,2	2078,3	2,078	18,60	89,54	
		Total	16947,0	6943,7	10003,3	10,003	89,54		
		Es. Sup.	Grande	1698,5	529,3	1169,2	1,169	10,46	100,00
		Total		18645,5	7473,0	11172,5	11,173	100,00	
		Infiltración en 10'		1324,9	0,0	514,4	0,0	100,00	0,00
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.									
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15l/h.									

Ensayo Nº5		Pendiente: 10%				Sin colmatar			
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes		
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)	
Fecha	Infiltración	1	1581,2	1390,9	190,3	0,190	1,67	1,67	
10/06/2010		2	4152,0	1386,0	2766,0	2,766	24,28	25,95	
		3	3690,7	1373,2	2317,5	2,318	20,34	46,30	
		4	3169,9	1374,4	1795,5	1,796	15,76	62,06	
		5	4209,3	1419,2	2790,1	2,790	24,49	86,55	
		Total	16803,1	6943,7	9859,4	9,859	86,55		
		Es. Sup.	Grande	2061,0	529,3	1531,7	1,532	13,45	100,00
		Total		18864,1	7473,0	11391,1	11,391	100,00	
		Infiltración en 10'		1324,9	0,0	514,4	0,0	100,00	0,00
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.									
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15l/h.									

Ensayo Nº6		Pendiente: 0%				Colmatado al máximo (1067gr)		
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes	
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)
Fecha	Infiltración	1	6676,6	1390,9	5285,7	5,286	49,70	49,70
14/06/2010		2	3340,2	1386,0	1954,2	1,954	18,38	68,08
		3	2907,3	1373,2	1534,1	1,534	14,43	82,51
		4	2170,7	1374,4	796,3	0,796	7,49	89,99
		5	1436,8	1419,2	17,6	0,018	0,17	90,16
		Total	16531,6	6943,7	9587,9	9,588	90,16	
		Es. Sup. Grande	1575,7	529,3	1046,4	1,046	9,84	100,00
		Total	18107,3	7473,0	10634,3	10,634	100,00	
		Infiltración en 10'	1324,9	0,0	514,4	0,0	100,00	0,00
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.								
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15l/h.								

Ensayo N°7		Pendiente: 3%				Colmatado al máximo (1067gr)			
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes		
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)	
Fecha	14/06/2010	Infiltración	1	1812,7	1390,9	421,8	0,422	3,98	3,98
			2	1967,9	1386,0	581,9	0,582	5,49	9,47
			3	2582,8	1373,2	1209,6	1,210	11,42	20,89
			4	2141,7	1374,4	767,3	0,767	7,24	28,14
			5	2013,3	1419,2	594,1	0,594	5,61	33,74
			Total	10518,4	6943,7	3574,7	3,575	33,74	
		Es. Sup.	Grande	7548,2	529,3	7018,9	7,019	66,26	100,00
		Total		18066,6	7473,0	10593,6	10,594	100,00	
		Infiltración en 10'		1324,9	0,0	514,4	0,0	100,00	0,00
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.									
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15l/h.									

Ensayo N°8		Pendiente: 5%				Colmatado al máximo (1067gr)			
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes		
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)	
Fecha	Infiltración	1	1660,0	1390,9	269,1	0,269	2,69	2,69	
14/06/2010		2	2031,2	1386,0	645,2	0,645	6,45	9,15	
		3	2820,7	1373,2	1447,5	1,448	14,48	23,63	
		4	1987,8	1374,4	613,4	0,613	6,14	29,76	
		5	2271,8	1419,2	852,6	0,853	8,53	38,29	
		Total	10771,5	6943,7	3827,8	3,828	38,29		
		Es. Sup.	Grande	6697,2	529,3	6167,9	6,168	61,71	100,00
		Total		17468,7	7473,0	9995,7	9,996	100,00	
		Infiltración en 10'		1324,9	0,0	514,4	0,0	100,00	0,00
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.									



Ensayo N <sup>º</sup> 9		Pendiente: 7%				Colmatado al máximo (1067gr)			
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes		
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)	
Fecha	Infiltración	1	1450,0	1390,9	59,1	0,059	0,54	0,54	
15/06/2010		2	1727,8	1386,0	341,8	0,342	3,09	3,63	
		3	2211,2	1373,2	838,0	0,838	7,59	11,22	
		4	1906,5	1374,4	532,1	0,532	4,82	16,03	
		5	3043,5	1419,2	1624,3	1,624	14,70	30,74	
		Total	10339,0	6943,7	3395,3	3,395	30,74		
		Es. Sup.	Grande	8180,1	529,3	7650,8	7,651	69,26	100,00
		Total		18519,1	7473,0	11046,1	11,046	100,00	
Infiltración en 10'		1324,9	0,0	514,4	0,0	100,00	0,00		
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.									
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15l/h.									

Ensayo Nº10		Pendiente: 10%				Colmatado al máximo (1067gr)		
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes	
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)
Fecha	Infiltración	1	1399,8	1390,9	8,9	0,009	0,08	0,08
15/06/2010		2	1546,5	1386,0	160,5	0,161	1,48	1,56
		3	2082,7	1373,2	709,5	0,710	6,55	8,11
		4	2093,3	1374,4	718,9	0,719	6,63	14,74
		5	3258,1	1419,2	1838,9	1,839	16,97	31,71
		Total	10380,4	6943,7	3436,7	3,437	31,71	
		Es. Sup. Grande	7930,0	529,3	7400,7	7,401	68,29	100,00
		Total	18310,4	7473,0	10837,4	10,837	100,00	
Infiltración en 10'	1324,9	0,0	514,4	0,0	100,00	0,00		
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.								
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15l/h.								

Ensayo Nº11		Pendiente: 0%				Con mantenimiento			
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes		
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)	
Fecha	18/06/2010	Infiltración	1	4654,9	1390,9	3264,0	3,264	31,42	31,42
			2	2554,4	1386,0	1168,4	1,168	11,25	42,66
			3	3715,7	1373,2	2342,5	2,343	22,55	65,21
			4	4877,1	1374,4	3502,7	3,503	33,72	98,93
			5	1474,7	1419,2	55,5	0,056	0,53	99,46
			Total	17276,8	6943,7	10333,1	10,333	99,46	
		Es. Sup.	Grande	569,4	513,4	56,0	0,056	0,54	100,00
		Total		17846,2	7457,1	10389,1	10,389	100,00	
		Infiltración en 10'		1324,9	0,0	514,4	0,0	100,00	0,00
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.									
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15l/h.									

Ensayo Nº12		Pendiente: 3%				Con mantenimiento			
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes		
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)	
Fecha	18/06/2010	Infiltración	1	1829,5	1390,9	438,6	0,439	4,21	4,21
			2	2075,6	1386,0	689,6	0,690	6,62	10,83
			3	2552,6	1373,2	1179,4	1,179	11,32	22,15
			4	2308,0	1374,4	933,6	0,934	8,96	31,11
			5	1935,9	1419,2	516,7	0,517	4,96	36,07
			Total	10701,6	6943,7	3757,9	3,758	36,07	
		Es. Sup.	Grande	7174,9	513,4	6661,5	6,662	63,93	100,00
		Total		17876,5	7457,1	10419,4	10,419	100,00	
	Infiltración en 10'		1324,9	0,0	514,4	0,0	100,00	0,00	
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.									
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15l/h.									



Ensayo Nº13		Pendiente: 5%				Con mantenimiento			
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes		
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)	
Fecha	Infiltración	1	1653,8	1390,9	262,9	0,263	2,47	2,47	
18/06/2010		2	1876,0	1386,0	490,0	0,490	4,61	7,08	
		3	2453,2	1373,2	1080,0	1,080	10,15	17,23	
		4	2167,8	1374,4	793,4	0,793	7,46	24,69	
		5	2447,2	1419,2	1028,0	1,028	9,66	34,35	
		Total	10598,0	6943,7	3654,3	3,654	34,35		
		Es. Sup.	Grande	7496,0	513,4	6982,6	6,983	65,65	100,00
		Total		18094,0	7457,1	10636,9	10,637	100,00	
Infiltración en 10'		1324,9	0,0	514,4	0,0	100,00	0,00		
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.									
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15l/h.									

Ensayo Nº14		Pendiente: 7%				Con mantenimiento		
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes	
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)
Fecha	Infiltración	1	1519,8	1390,9	128,9	0,129	1,21	1,21
18/06/2010		2	1743,1	1386,0	357,1	0,357	3,36	4,57
		3	2198,9	1373,2	825,7	0,826	7,77	12,35
		4	2211,2	1374,4	836,8	0,837	7,88	20,22
		5	2749,0	1419,2	1329,8	1,330	12,52	32,74
		Total	10422,0	6943,7	3478,3	3,478	32,74	
		Es. Sup. Grande	7658,7	513,4	7145,3	7,145	67,26	100,00
		Total	18080,7	7457,1	10623,6	10,624	100,00	
		Infiltración en 10'	1324,9	0,0	514,4	0,0	100,00	0,00
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.								
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15l/h.								

Ensayo Nº15		Pendiente: 10%				Con mantenimiento			
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes		
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)	
Fecha	Infiltración	1	1397,6	1390,9	6,7	0,007	0,06	0,06	
18/06/2010		2	1577,8	1386,0	191,8	0,192	1,82	1,88	
		3	2158,8	1373,2	785,6	0,786	7,44	9,32	
		4	2181,2	1374,4	806,8	0,807	7,64	16,97	
		5	3300,9	1419,2	1881,7	1,882	17,83	34,79	
		Total	10616,3	6943,7	3672,6	3,673	34,79		
		Es. Sup. Grande	7396,7	513,4	6883,3	6,883	65,21	100,00	
		Total		18013,0	7457,1	10555,9	10,556	100,00	
		Infiltración en 10'		1324,9	0,0	514,4	0,0	100,00	0,00
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.									
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15l/h.									

☐ Probeta N°2

Ensayo Nº16		Pendiente: 0%				Sin colmatar			
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes		
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)	
Fecha	Infiltración	1	4960,5	1390,9	3569,6	3,570	35,09	35,09	
24/06/2010		2	3646,5	1386,0	2260,5	2,261	22,22	57,31	
		3	4085,7	1373,2	2712,5	2,713	26,66	83,97	
		4	2923,8	1374,4	1549,4	1,549	15,23	99,20	
		5	1464,2	1419,2	45,0	0,045	0,44	99,65	
		Total	17080,7	6943,7	10137,0	10,137	99,65		
		Es. Sup.	Grande	559,0	523,1	35,9	0,036	0,35	100,00
		Total		17639,7	7466,8	10172,9	10,173	100,00	
		Infiltración en 10'		1324,9	0,0	514,4	0,0	100,00	0,00
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.									
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15l/h.									

Ensayo Nº17		Pendiente: 3%				Sin colmatar		
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes	
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)
Fecha	Infiltración	1	2734,7	1390,9	1343,8	1,344	14,53	14,53
24/06/2010		2	4391,5	1386,0	3005,5	3,006	32,49	47,01
		3	3446,2	1373,2	2073,0	2,073	22,41	69,42
		4	2900,4	1374,4	1526,0	1,526	16,49	85,91
		5	2591,5	1419,2	1172,3	1,172	12,67	98,59
		Total	16064,3	6943,7	9120,6	9,121	98,59	
		Es. Sup. Grande	654,0	523,1	130,9	0,131	1,41	100,00
		Total	16718,3	7466,8	9251,5	9,252	100,00	
		Infiltración en 10'	1324,9	0,0	514,4	0,0	100,00	0,00
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.								
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15l/h.								

Ensayo Nº18		Pendiente: 5%				Sin colmatar			
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes		
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)	
Fecha	29/06/2010	Infiltración	1	2525,8	1390,9	1134,9	1,135	10,48	10,48
			2	3848,5	1386,0	2462,5	2,463	22,73	33,20
			3	3886,2	1373,2	2513,0	2,513	23,20	56,40
			4	4061,3	1374,4	2686,9	2,687	24,80	81,20
			5	3084,0	1419,2	1664,8	1,665	15,37	96,57
			Total	17405,8	6943,7	10462,1	10,462	96,57	
		Es. Sup.	Grande	895,0	523,1	371,9	0,372	3,43	100,00
		Total		18300,8	7466,8	10834,0	10,834	100,00	
		Infiltración en 10'		1324,9	0,0	514,4	0,0	100,00	0,00
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.									
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15l/h.									

Ensayo Nº19		Pendiente: 7%				Sin colmatar			
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes		
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)	
Fecha	29/06/2010	Infiltración	1	1391,4	1390,9	0,5	0,001	0,00	0,00
			2	3666,7	1386,0	2280,7	2,281	21,81	21,81
			3	3962,6	1373,2	2589,4	2,589	24,76	46,57
			4	3810,0	1374,4	2435,6	2,436	23,29	69,85
			5	4154,4	1419,2	2735,2	2,735	26,15	96,01
			Total	16985,1	6943,7	10041,4	10,041	96,01	
		Es. Sup.	Grande	940,9	523,1	417,8	0,418	3,99	100,00
		Total		17926,0	7466,8	10459,2	10,459	100,00	
		Infiltración en 10'		1324,9	0,0	514,4	0,0	100,00	0,00
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.									
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15l/h.									

Ensayo Nº20		Pendiente: 10%				Sin colmatar		
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes	
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)
Fecha	Infiltración      Es. Sup.  Total  Infiltración en 10'	1	1393,5	1390,9	2,6	0,003	0,02	0,02
30/06/2010		2	3157,6	1386,0	1771,6	1,772	16,95	16,98
		3	3559,8	1373,2	2186,6	2,187	20,93	37,91
		4	4367,0	1374,4	2992,6	2,993	28,64	66,55
		5	4313,3	1419,2	2894,1	2,894	27,70	94,24
		Total	16791,2	6943,7	9847,5	9,848	94,24	
		Grande	1124,5	523,1	601,4	0,601	5,76	100,00
		Total	17915,7	7466,8	10448,9	10,449	100,00	
		Infiltración en 10'	1324,9	0,0	514,4	0,0	100,00	0,00
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.								
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15l/h.								

Ensayo Nº21		Pendiente: 0%				Colmatado al máximo (869,2gr)		
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes	
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)
Fecha	Infiltración      Es. Sup.  Total  Infiltración en 10'	1	2562,6	1390,9	1171,7	1,172	12,44	12,44
01/07/2010		2	3717,5	1386,0	2331,5	2,332	24,76	37,20
		3	4344,7	1373,2	2971,5	2,972	31,55	68,75
		4	3944,8	1374,4	2570,4	2,570	27,29	96,04
		5	1576,4	1419,2	157,2	0,157	1,67	97,71
		Total	16146,0	6943,7	9202,3	9,202	97,71	
		Grande	738,6	523,1	215,5	0,216	2,29	100,00
		Total	16884,6	7466,8	9417,8	9,418	100,00	
		Infiltración en 10'	1324,9	0,0	514,4	0,0	100,00	0,00
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.								
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15l/h.								



Ensayo Nº22		Pendiente: 3%				Colmatado al máximo (869,2gr)			
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes		
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)	
Fecha	Infiltración	1	1392,9	1390,9	2,0	0,002	0,02	0,02	
01/07/2010		2	2356,2	1386,0	970,2	0,970	9,60	9,62	
		3	3522,3	1373,2	2149,1	2,149	21,27	30,89	
		4	3776,4	1374,4	2402,0	2,402	23,77	54,66	
		5	1912,0	1419,2	492,8	0,493	4,88	59,54	
		Total	12959,8	6943,7	6016,1	6,016	59,54		
		Es. Sup.	Grande	4611,2	523,1	4088,1	4,088	40,46	100,00
		Total		17571,0	7466,8	10104,2	10,104	100,00	
Infiltración en 10'		1324,9	0,0	514,4	0,0	100,00	0,00		
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.									
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15l/h.									

Ensayo Nº23		Pendiente: 5%				Colmatado al máximo (869,2gr)		
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes	
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)
Fecha	Infiltración      Es. Sup.  Total  Infiltración en 10'	1	1390,9	1390,9	0,0	0,000	0,00	0,00
01/07/2010		2	1581,9	1386,0	195,9	0,196	2,16	2,16
		3	3098,7	1373,2	1725,5	1,726	19,01	21,17
		4	3467,7	1374,4	2093,3	2,093	23,07	44,24
		5	2902,4	1419,2	1483,2	1,483	16,34	60,58
		Total	12441,6	6943,7	5497,9	5,498	60,58	
		Grande	4100,0	523,1	3576,9	3,577	39,42	100,00
		Total	16541,6	7466,8	9074,8	9,075	100,00	
	Infiltración en 10'	1324,9	0,0	514,4	0,0	100,00	0,00	
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.								
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15l/h.								

Ensayo Nº24		Pendiente: 7%				Colmatado al máximo (869,2gr)			
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes		
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)	
Fecha	Infiltración	1	1390,9	1390,9	0,0	0,000	0,00	0,00	
01/07/2010		2	1402,5	1386,0	16,5	0,017	0,15	0,15	
		3	2802,5	1373,2	1429,3	1,429	13,39	13,54	
		4	3831,9	1374,4	2457,5	2,458	23,02	36,57	
		5	3023,5	1419,2	1604,3	1,604	15,03	51,60	
		Total	12451,3	6943,7	5507,6	5,508	51,60		
		Es. Sup.	Grande	5690,0	523,1	5166,9	5,167	48,40	100,00
		Total		18141,3	7466,8	10674,5	10,675	100,00	
		Infiltración en 10'		1324,9	0,0	514,4	0,0	100,00	0,00
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.									
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15l/h.									

Ensayo Nº25		Pendiente: 10%				Colmatado al máximo (869,2gr)			
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes		
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)	
Fecha	Infiltración	1	1390,9	1390,9	0,0	0,000	0,00	0,00	
01/07/2010		2	1392,9	1386,0	6,9	0,007	0,06	0,06	
		3	2755,8	1373,2	1382,6	1,383	12,51	12,57	
		4	2761,6	1374,4	1387,2	1,387	12,55	25,12	
		5	3905,0	1419,2	2485,8	2,486	22,48	47,60	
		Total	12206,2	6943,7	5262,5	5,263	47,60		
		Es. Sup.	Grande	6316,5	523,1	5793,4	5,793	52,40	100,00
		Total		18522,7	7466,8	11055,9	11,056	100,00	
		Infiltración en 10'		1324,9	0,0	514,4	0,0	100,00	0,00
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.									
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15l/h.									

Ensayo Nº26		Pendiente: 0%				Con mantenimiento		
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes	
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)
Fecha	Infiltración      Es. Sup.  Total  Infiltración en 10'	1	4389,4	1390,9	2998,5	2,999	29,19	29,19
02/07/2010		2	3140,2	1386,0	1754,2	1,754	17,08	46,27
		3	4448,7	1373,2	3075,5	3,076	29,94	76,22
		4	3430,1	1374,4	2055,7	2,056	20,01	96,23
		5	1431,6	1419,2	12,4	0,012	0,12	96,35
		Total	16840,0	6943,7	9896,3	9,896	96,35	
		Grande	897,8	523,1	374,7	0,375	3,65	100,00
		Total	17737,8	7466,8	10271,0	10,271	100,00	
	Infiltración en 10'	1324,9	0,0	514,4	0,0	100,00	0,00	
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.								
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15l/h.								

Ensayo Nº27		Pendiente: 3%				Con mantenimiento		
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes	
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)
Fecha	Infiltración      Es. Sup.  Total  Infiltración en 10'	1	1391,9	1390,9	1,0	0,001	0,01	0,01
02/07/2010		2	2235,0	1386,0	849,0	0,849	7,96	7,97
		3	3605,2	1373,2	2232,0	2,232	20,93	28,91
		4	3464,5	1374,4	2090,1	2,090	19,60	48,51
		5	1808,5	1419,2	389,3	0,389	3,65	52,16
		Total	12505,1	6943,7	5561,4	5,561	52,16	
		Grande	5623,3	523,1	5100,2	5,100	47,84	100,00
		Total	18128,4	7466,8	10661,6	10,662	100,00	
	Infiltración en 10'	1324,9	0,0	514,4	0,0	100,00	0,00	
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.								
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15l/h.								

Ensayo Nº28		Pendiente: 5%				Con mantenimiento		
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes	
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)
Fecha	Infiltración      Es. Sup.  Total  Infiltración en 10'	1	1390,9	1390,9	0,0	0,000	0,00	0,00
02/07/2010		2	1615,8	1386,0	229,8	0,230	2,44	2,44
		3	3326,4	1373,2	1953,2	1,953	20,72	23,15
		4	3116,3	1374,4	1741,9	1,742	18,48	41,63
		5	2332,7	1419,2	913,5	0,914	9,69	51,32
		Total	11782,1	6943,7	4838,4	4,838	51,32	
		Grande	5112,5	523,1	4589,4	4,589	48,68	100,00
		Total	16894,6	7466,8	9427,8	9,428	100,00	
		Infiltración en 10'	1324,9	0,0	514,4	0,0	100,00	0,00
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.								
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15l/h.								

Ensayo Nº29		Pendiente: 7%				Con mantenimiento			
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes		
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)	
Fecha	02/07/2010	Infiltración	1	1390,9	1390,9	0,0	0,000	0,00	0,00
			2	1410,1	1386,0	24,1	0,024	0,25	0,25
			3	2868,8	1373,2	1495,6	1,496	15,47	15,72
			4	3159,9	1374,4	1785,5	1,786	18,47	34,20
			5	3000,2	1419,2	1581,0	1,581	16,36	50,55
			Total	11829,9	6943,7	4886,2	4,886	50,55	
		Es. Sup.	Grande	5302,5	523,1	4779,4	4,779	49,45	100,00
		Total		17132,4	7466,8	9665,6	9,666	100,00	
		Infiltración en 10'		1324,9	0,0	514,4	0,0	100,00	0,00
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.									
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15l/h.									

□ Probeta N°3

Ensayo Nº30		Pendiente: 10%				Con mantenimiento			
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes		
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)	
Fecha	Infiltración	1	1390,9	1390,9	0,0	0,000	0,00	0,00	
02/07/2010		2	2022,4	1386,0	636,4	0,636	5,85	5,85	
		3	2791,5	1373,2	1418,3	1,418	13,03	18,88	
		4	3236,0	1374,4	1861,6	1,862	17,11	35,99	
		5	3941,0	1419,2	2521,8	2,522	23,17	59,16	
		Total	13381,8	6943,7	6438,1	6,438	59,16		
		Es. Sup.	Grande	4967,5	523,1	4444,4	4,444	40,84	100,00
		Total		18349,3	7466,8	10882,5	10,883	100,00	
Infiltración en 10'		1324,9	0,0	514,4	0,0	100,00	0,00		
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.									
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15l/h.									

Ensayo Nº31		Pendiente: 0%				Sin colmatar		
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes	
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)
Fecha	Infiltración	1	5777,1	1390,9	4386,2	4,386	42,84	42,84
24/06/2010		2	2931,8	1386,0	1545,8	1,546	15,10	57,93
		3	4016,1	1373,2	2642,9	2,643	25,81	83,74
		4	2703,4	1374,4	1329,0	1,329	12,98	96,72
		5	1712,5	1419,2	293,3	0,293	2,86	99,59
		Total	17140,9	6943,7	10197,2	10,197	99,59	
		Es. Sup. Grande	565,5	523,1	42,4	0,042	0,41	100,00
		Total	17706,4	7466,8	10239,6	10,240	100,00	
		Infiltración en 10'	1324,9	0,0	514,4	0,0	100,00	0,00
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.								
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15l/h.								

Ensayo Nº32		Pendiente: 3%				Sin colmatar		
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes	
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)
Fecha	Infiltración      Es. Sup.  Total  Infiltración en 10'	1	3552,4	1390,9	2161,5	2,162	22,35	22,35
24/06/2010		2	2306,6	1386,0	920,6	0,921	9,52	31,87
		3	4484,5	1373,2	3111,3	3,111	32,17	64,04
		4	2698,3	1374,4	1323,9	1,324	13,69	77,73
		5	3114,7	1419,2	1695,5	1,696	17,53	95,26
		Total	16156,5	6943,7	9212,8	9,213	95,26	
		Grande	981,3	523,1	458,2	0,458	4,74	100,00
		Total	17137,8	7466,8	9671,0	9,671	100,00	
		Infiltración en 10'	1324,9	0,0	514,4	0,0	100,00	0,00
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.								
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15l/h.								

Ensayo Nº33		Pendiente: 5%				Sin colmatar			
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes		
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)	
Fecha	Infiltración	1	2602,2	1390,9	1211,3	1,211	12,74	12,74	
29/06/2010		2	2522,0	1386,0	1136,0	1,136	11,95	24,69	
		3	4120,0	1373,2	2746,8	2,747	28,89	53,58	
		4	2623,4	1374,4	1249,0	1,249	13,14	66,72	
		5	4221,6	1419,2	2802,4	2,802	29,48	96,20	
		Total	16089,2	6943,7	9145,5	9,146	96,20		
		Es. Sup.	Grande	884,5	523,1	361,4	0,361	3,80	100,00
		Total		16973,7	7466,8	9506,9	9,507	100,00	
		Infiltración en 10'		1324,9	0,0	514,4	0,0	100,00	0,00
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.									
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15l/h.									

Ensayo Nº34		Pendiente: 7%				Sin colmatar			
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes		
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)	
Fecha	Infiltración	1	2712,2	1390,9	1321,3	1,321	12,16	12,16	
29/06/2010		2	2907,0	1386,0	1521,0	1,521	14,00	26,15	
		3	3983,6	1373,2	2610,4	2,610	24,02	50,18	
		4	1920,7	1374,4	546,3	0,546	5,03	55,20	
		5	5320,7	1419,2	3901,5	3,902	35,90	91,10	
		Total	16844,2	6943,7	9900,5	9,901	91,10		
		Es. Sup.	Grande	1489,8	523,1	966,7	0,967	8,90	100,00
		Total		18334,0	7466,8	10867,2	10,867	100,00	
Infiltración en 10'		1324,9	0,0	514,4	0,0	100,00	0,00		
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.									
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15l/h.									

Ensayo Nº35		Pendiente: 10%				Sin colmatar		
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes	
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)
Fecha	Infiltración	1	1427,0	1390,9	36,1	0,036	0,33	0,33
30/06/2010		2	2801,2	1386,0	1415,2	1,415	12,84	13,17
		3	3814,2	1373,2	2441,0	2,441	22,15	35,32
		4	1916,9	1374,4	542,5	0,543	4,92	40,25
		5	7006,3	1419,2	5587,1	5,587	50,70	90,95
		Total	16965,6	6943,7	10021,9	10,022	90,95	
		Es. Sup. Grande	1520,2	523,1	997,1	0,997	9,05	100,00
		Total	18485,8	7466,8	11019,0	11,019	100,00	
Infiltración en 10'	1324,9	0,0	514,4	0,0	100,00	0,00		
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.								
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15l/h.								

Ensayo Nº36		Pendiente: 0%				Colmatado al máximo (983,4gr)			
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes		
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)	
Fecha	27/08/2010	Infiltración	1	2162,1	1390,9	771,2	0,771	8,04	8,04
			2	2785,7	1386,0	1399,7	1,400	14,59	22,63
			3	4025,8	1373,2	2652,6	2,653	27,65	50,28
			4	3718,6	1374,4	2344,2	2,344	24,43	74,71
			5	1814,4	1419,2	395,2	0,395	4,12	78,83
			Total	14506,6	6943,7	7562,9	7,563	78,83	
		Es. Sup.	Grande	2554,0	523,1	2030,9	2,031	21,17	100,00
		Total		17060,6	7466,8	9593,8	9,594	100,00	
		Infiltración en 10'		1324,9	0,0	514,4	0,0	100,00	0,00
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.									
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15l/h.									

Ensayo Nº37		Pendiente: 3%				Colmatado al máximo (983,4gr)		
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes	
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)
Fecha	Infiltración      Es. Sup.  Total  Infiltración en 10'	1	1474,8	1390,9	83,9	0,084	0,85	0,85
27/08/2010		2	1775,5	1386,0	389,5	0,390	3,95	4,80
		3	3403,4	1373,2	2030,2	2,030	20,60	25,40
		4	2357,6	1374,4	983,2	0,983	9,97	35,37
		5	2909,0	1419,2	1489,8	1,490	15,11	50,49
		Total	11920,3	6943,7	4976,6	4,977	50,49	
		Grande	5403,9	523,1	4880,8	4,881	49,51	100,00
		Total	17324,2	7466,8	9857,4	9,857	100,00	
		Infiltración en 10'	1324,9	0,0	514,4	0,0	100,00	0,00
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.								
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15l/h.								



Ensayo Nº38		Pendiente: 5%				Colmatado al máximo (983,4gr)			
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes		
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)	
Fecha	27/08/2010	Infiltración	1	1395,1	1390,9	4,2	0,004	0,05	0,05
			2	1479,3	1386,0	93,3	0,093	1,02	1,06
			3	2532,4	1373,2	1159,2	1,159	12,65	13,71
			4	1759,5	1374,4	385,1	0,385	4,20	17,91
			5	2829,3	1419,2	1410,1	1,410	15,39	33,30
			Total	9995,6	6943,7	3051,9	3,052	33,30	
		Es. Sup.	Grande	6636,6	523,1	6113,5	6,114	66,70	100,00
		Total		16632,2	7466,8	9165,4	9,165	100,00	
		Infiltración en 10'		1324,9	0,0	514,4	0,0	100,00	0,00
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.									
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15l/h.									

Ensayo Nº39		Pendiente: 7%				Colmatado al máximo (983,4gr)			
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes		
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)	
Fecha	29/06/2010	Infiltración	1	1391,9	1390,9	1,0	0,001	0,01	0,01
			2	1388,0	1386,0	2,0	0,002	0,02	0,03
			3	2262,7	1373,2	889,5	0,890	8,60	8,63
			4	1589,3	1374,4	214,9	0,215	2,08	10,70
			5	3447,4	1419,2	2028,2	2,028	19,60	30,30
			Total	10079,3	6943,7	3135,6	3,136	30,30	
		Es. Sup.	Grande	7734,4	523,1	7211,3	7,211	69,70	100,00
		Total		17813,7	7466,8	10346,9	10,347	100,00	
	Infiltración en 10'		1324,9	0,0	514,4	0,0	100,00	0,00	
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.									
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15l/h.									

Ensayo Nº40		Pendiente: 10%				Colmatado al máximo (983,4gr)		
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes	
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)
Fecha	Infiltración      Es. Sup.  Total  Infiltración en 10'	1	1563,3	1390,9	172,4	0,172	1,64	1,64
27/08/2010		2	1388,2	1386,0	2,2	0,002	0,02	1,67
		3	2291,1	1373,2	917,9	0,918	8,75	10,42
		4	1554,4	1374,4	180,0	0,180	1,72	12,14
		5	4070,2	1419,2	2651,0	2,651	25,28	37,42
		Total	10867,2	6943,7	3923,5	3,924	37,42	
		Grande	7084,9	523,1	6561,8	6,562	62,58	100,00
		Total	17952,1	7466,8	10485,3	10,485	100,00	
		Infiltración en 10'	1324,9	0,0	514,4	0,0	100,00	0,00
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.								
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15l/h.								

Ensayo Nº41		Pendiente: 0%				Con mantenimiento			
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes		
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)	
Fecha	Infiltración	1	3628,2	1390,9	2237,3	2,237	22,94	22,94	
01/09/2010		2	2234,7	1386,0	848,7	0,849	8,70	31,64	
		3	3124,5	1373,2	1751,3	1,751	17,96	49,60	
		4	2413,1	1374,4	1038,7	1,039	10,65	60,25	
		5	5247,1	1419,2	3827,9	3,828	39,25	99,50	
		Total	16647,6	6943,7	9703,9	9,704	99,50		
		Es. Sup.	Grande	572,0	523,1	48,9	0,049	0,50	100,00
		Total		17219,6	7466,8	9752,8	9,753	100,00	
		Infiltración en 10'		1324,9	0,0	514,4	0,0	100,00	0,00
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.									
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15l/h.									

Ensayo Nº42		Pendiente: 3%				Con mantenimiento			
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes		
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)	
Fecha	01/09/2010	Infiltración	1	3338,0	1390,9	1947,1	1,947	20,98	20,98
			2	1898,0	1386,0	512,0	0,512	5,52	26,50
			3	2886,2	1373,2	1513,0	1,513	16,30	42,80
			4	1858,6	1374,4	484,2	0,484	5,22	48,02
			5	3383,0	1419,2	1963,8	1,964	21,16	69,18
			Total	13363,8	6943,7	6420,1	6,420	69,18	
		Es. Sup.	Grande	3383,7	523,1	2860,6	2,861	30,82	100,00
		Total		16747,5	7466,8	9280,7	9,281	100,00	
	Infiltración en 10'		1324,9	0,0	514,4	0,0	100,00	0,00	
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.									
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15l/h.									

Ensayo Nº43		Pendiente: 5%				Con mantenimiento			
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes		
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)	
Fecha	01/09/2010	Infiltración	1	2753,7	1390,9	1362,8	1,363	15,55	15,55
			2	1583,2	1386,0	197,2	0,197	2,25	17,80
			3	2745,8	1373,2	1372,6	1,373	15,66	33,46
			4	1676,6	1374,4	302,2	0,302	3,45	36,91
			5	3762,9	1419,2	2343,7	2,344	26,74	63,65
			Total	12522,2	6943,7	5578,5	5,579	63,65	
		Es. Sup.	Grande	3709,5	523,1	3186,4	3,186	36,35	100,00
		Total		16231,7	7466,8	8764,9	8,765	100,00	
Infiltración en 10'		1324,9	0,0	514,4	0,0	100,00	0,00		
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.									
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15l/h.									

Ensayo Nº44		Pendiente: 7%				Con mantenimiento			
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes		
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)	
Fecha	Infiltración	1	2504,5	1390,9	1113,6	1,114	10,64	10,64	
01/09/2010		2	1629,4	1386,0	243,4	0,243	2,32	12,96	
		3	2906,8	1373,2	1533,6	1,534	14,65	27,61	
		4	1623,0	1374,4	248,6	0,249	2,37	29,99	
		5	4657,0	1419,2	3237,8	3,238	30,93	60,91	
		Total	13320,7	6943,7	6377,0	6,377	60,91		
		Es. Sup.	Grande	4615,1	523,1	4092,0	4,092	39,09	100,00
		Total		17935,8	7466,8	10469,0	10,469	100,00	
		Infiltración en 10'		1324,9	0,0	514,4	0,0	100,00	0,00
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.									
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15l/h.									

Ensayo Nº45		Pendiente: 10%				Con mantenimiento		
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes	
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)
Fecha	Infiltración	1	1400,0	1390,9	9,1	0,009	0,09	0,09
01/09/2010		2	1610,1	1386,0	224,1	0,224	2,10	2,19
		3	3204,5	1373,2	1831,3	1,831	17,18	19,36
		4	2701,3	1374,4	1326,9	1,327	12,44	31,81
		5	4010,2	1419,2	2591,0	2,591	24,30	56,11
		Total	12926,1	6943,7	5982,4	5,982	56,11	
		Es. Sup. Grande	5203,1	523,1	4680,0	4,680	43,89	100,00
		Total	18129,2	7466,8	10662,4	10,662	100,00	
		Infiltración en 10'	1324,9	0,0	514,4	0,0	100,00	0,00
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.								
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15l/h.								

## PAVIMENTOS PERMEABLES CON SUPERFICIES DE HORMIGÓN POROSO REFORZADO CON POLÍMEROS

## □ Probeta N°1

Ensayo Nº46		Pendiente: 0%				Sin colmatar		
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes	
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)
Fecha	Infiltración	1	3592,8	1396,8	2196,0	2,196	20,52	20,52
03/12/2010		2	5415,0	1391,9	4023,1	4,023	37,60	58,12
		3	4335,7	1378,0	2957,7	2,958	27,64	85,77
		4	2705,5	1378,5	1327,0	1,327	12,40	98,17
		5	1609,4	1422,7	186,7	0,187	1,74	99,91
		Total	17658,4	6967,9	10690,5	10,691	99,91	
		Es. Sup.	Grande	525,9	516,6	9,3	0,009	0,09
Total		18184,3	7484,5	10699,8	10,700	100,00		
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.								
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15L/h.								

Ensayo Nº47		Pendiente: 3%					Sin colmatar		
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes		
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)	
Fecha	Infiltración	1	2491,9	1395,4	1096,5	1,097	10,63	10,63	
03/12/2010		2	3656,4	1387,7	2268,7	2,269	22,00	32,64	
		3	3837,1	1380,1	2457,0	2,457	23,83	56,47	
		4	3841,9	1377,7	2464,2	2,464	23,90	80,36	
		5	3420,0	1423,0	1997,0	1,997	19,37	99,73	
		Total	17247,3	6963,9	10283,4	10,283	99,73		
		Es. Sup.	Grande	547,9	520,2	27,7	0,028	0,27	100,00
		Total		17795,2	7484,1	10311,1	10,311	100,00	
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.									
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15L/h.									

Ensayo Nº48		Pendiente: 5%				Sin colmatar			
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes		
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)	
Fecha	Infiltración	1	1496,8	1395,4	101,4	0,101	0,97	0,97	
03/12/2010		2	3463,7	1387,7	2076,0	2,076	19,82	20,79	
		3	4162,2	1380,1	2782,1	2,782	26,56	47,35	
		4	3446,3	1377,7	2068,6	2,069	19,75	67,10	
		5	4831,4	1423,0	3408,4	3,408	32,54	99,64	
		Total	17400,4	6963,9	10436,5	10,437	99,64		
		Es. Sup.	Grande	558,1	520,2	37,9	0,038	0,36	100,00
		Total		17958,5	7484,1	10474,4	10,474	100,00	
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.									
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15L/h.									

Ensayo Nº49		Pendiente: 7%				Sin colmatar			
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes		
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)	
Fecha	Infiltración	1	1396,8	1395,4	1,4	0,001	0,01	0,01	
03/12/2010		2	1872,2	1387,7	484,5	0,485	4,48	4,49	
		3	3217,4	1380,1	1837,3	1,837	16,99	21,48	
		4	4451,4	1377,7	3073,7	3,074	28,42	49,90	
		5	6742,3	1423,0	5319,3	5,319	49,18	99,09	
		Total	17680,1	6963,9	10716,2	10,716	99,09		
		Es. Sup.	Grande	619,1	520,2	98,9	0,099	0,91	100,00
		Total		18299,2	7484,1	10815,1	10,815	100,00	
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.									
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15L/h.									

Ensayo Nº50		Pendiente: 10%				Sin colmatar			
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes		
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)	
Fecha	Infiltración	1	1395,4	1395,4	0,0	0,000	0,00	0,00	
03/12/2010		2	1399,2	1387,7	11,5	0,012	0,11	0,11	
		3	2268,4	1380,1	888,3	0,888	8,65	8,76	
		4	3999,8	1377,7	2622,1	2,622	25,52	34,28	
		5	7567,7	1423,0	6144,7	6,145	59,81	94,09	
		Total	16630,5	6963,9	9666,6	9,667	94,09		
		Es. Sup.	Grande	1127,3	520,2	607,1	0,607	5,91	100,00
		Total		17757,8	7484,1	10273,7	10,274	100,00	
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.									
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15L/h.									

Ensayo Nº51		Pendiente: 0%				Colmatado al máximo (500gr)		
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes	
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)
Fecha	Infiltración	1	6324,2	1395,4	4928,8	4,929	47,22	47,22
20/01/2011		2	3215,1	1387,7	1827,4	1,827	17,51	64,73
		3	3154,0	1380,1	1773,9	1,774	16,99	81,72
		4	2861,0	1377,7	1483,3	1,483	14,21	95,93
		5	1739,3	1423,0	316,3	0,316	3,03	98,96
		Total	17293,6	6963,9	10329,7	10,330	98,96	
		Es. Sup.	Grande	628,4	520,2	108,2	0,108	1,04
Total		17922,0	7484,1	10437,9	10,438	100,00		
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.								
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15L/h.								

Ensayo Nº52		Pendiente: 3%				Colmatado al máximo (500gr)			
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes		
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)	
Fecha	Infiltración	1	3932,0	1395,4	2536,6	2,537	23,90	23,90	
20/01/2011		2	3667,0	1387,7	2279,3	2,279	21,47	45,37	
		3	2949,3	1380,1	1569,2	1,569	14,78	60,16	
		4	3284,0	1377,7	1906,3	1,906	17,96	78,12	
		5	3709,1	1423,0	2286,1	2,286	21,54	99,66	
		Total	17541,4	6963,9	10577,5	10,578	99,66		
		Es. Sup.	Grande	556,8	520,2	36,6	0,037	0,34	100,00
		Total		18098,2	7484,1	10614,1	10,614	100,00	
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.									
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15L/h.									

Ensayo Nº53		Pendiente: 5%				Colmatado al máximo (500gr)		
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes	
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)
Fecha	Infiltración	1	2083,1	1395,4	687,7	0,688	6,87	6,87
20/01/2011		2	3398,0	1387,7	2010,3	2,010	20,09	26,96
		3	2938,0	1380,1	1557,9	1,558	15,57	42,53
		4	3477,4	1377,7	2099,7	2,100	20,98	63,51
		5	5019,8	1423,0	3596,8	3,597	35,94	99,45
		Total	16916,3	6963,9	9952,4	9,952	99,45	
		Es. Sup.	Grande	574,9	520,2	54,7	0,055	0,55
Total		17491,2	7484,1	10007,1	10,007	100,00		
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.								
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15L/h.								



Ensayo Nº54		Pendiente: 7%				Colmatado al máximo (500gr)		
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes	
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)
Fecha	Infiltración	1	1839,4	1395,4	444,0	0,444	3,93	3,93
20/01/2011		2	2618,5	1387,7	1230,8	1,231	10,89	14,81
		3	3908,0	1380,1	2527,9	2,528	22,36	37,17
		4	3883,5	1377,7	2505,8	2,506	22,16	59,33
		5	5956,0	1423,0	4533,0	4,533	40,09	99,43
		Total	18205,4	6963,9	11241,5	11,242	99,43	
		Es. Sup.	Grande	585,1	520,2	64,9	0,065	0,57
Total		18790,5	7484,1	11306,4	11,306	100,00		
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.								
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15L/h.								

Ensayo Nº55		Pendiente: 10%				Colmatado al máximo (500gr)		
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes	
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)
Fecha	Infiltración	1	1396,7	1395,4	1,3	0,001	0,01	0,01
20/01/2011		2	1607,1	1387,7	219,4	0,219	2,08	2,10
		3	3213,9	1380,1	1833,8	1,834	17,42	19,52
		4	3655,6	1377,7	2277,9	2,278	21,64	41,16
		5	7056,0	1423,0	5633,0	5,633	53,51	94,67
		Total	16929,3	6963,9	9965,4	9,965	94,67	
		Es. Sup.	Grande	1081,2	520,2	561,0	0,561	5,33
Total		18010,5	7484,1	10526,4	10,526	100,00		
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.								
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15L/h.								

Ensayo Nº56		Pendiente: 0%				Con mantenimiento			
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes		
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)	
Fecha	Infiltración	1	6496,8	1395,4	5101,4	5,101	49,23	49,23	
27/01/2011		2	3481,0	1387,7	2093,3	2,093	20,20	69,43	
		3	2900,6	1380,1	1520,5	1,521	14,67	84,10	
		4	2674,7	1377,7	1297,0	1,297	12,52	96,62	
		5	1732,9	1423,0	309,9	0,310	2,99	99,61	
		Total	17286,0	6963,9	10322,1	10,322	99,61		
		Es. Sup.	Grande	561,0	520,2	40,8	0,041	0,39	100,00
		Total		17847,0	7484,1	10362,9	10,363	100,00	
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.									
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15L/h.									

Ensayo Nº57		Pendiente: 3%				Con mantenimiento		
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes	
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)
Fecha	Infiltración	1	4133,9	1395,4	2738,5	2,739	26,98	26,98
27/01/2011		2	3341,8	1387,7	1954,1	1,954	19,25	46,23
		3	2839,5	1380,1	1459,4	1,459	14,38	60,61
		4	2705,2	1377,7	1327,5	1,328	13,08	73,69
		5	4010,0	1423,0	2587,0	2,587	25,49	99,18
		Total	17030,4	6963,9	10066,5	10,067	99,18	
		Es. Sup.	Grande	603,9	520,2	83,7	0,084	0,82
Total		17634,3	7484,1	10150,2	10,150	100,00		
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.								
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15L/h.								

Ensayo Nº58		Pendiente: 5%					Con mantenimiento	
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes	
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)
Fecha	Infiltración	1	2925,6	1395,4	1530,2	1,530	15,36	15,36
27/01/2011		2	3020,1	1387,7	1632,4	1,632	16,38	31,74
		3	3113,6	1380,1	1733,5	1,734	17,40	49,14
		4	3023,4	1377,7	1645,7	1,646	16,52	65,66
		5	4738,7	1423,0	3315,7	3,316	33,28	98,94
		Total	16821,4	6963,9	9857,5	9,858	98,94	
		Es. Sup.	Grande	626,2	520,2	106,0	0,106	1,06
Total		17447,6	7484,1	9963,5	9,964	100,00		
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.								
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15L/h.								

Ensayo Nº59		Pendiente: 7%				Con mantenimiento		
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes	
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)
Fecha	Infiltración	1	1975,8	1395,4	580,4	0,580	5,52	5,52
27/01/2011		2	3163,0	1387,7	1775,3	1,775	16,89	22,41
		3	3678,2	1380,1	2298,1	2,298	21,86	44,27
		4	3298,3	1377,7	1920,6	1,921	18,27	62,54
		5	5189,2	1423,0	3766,2	3,766	35,83	98,36
		Total	17304,5	6963,9	10340,6	10,341	98,36	
		Es. Sup.	Grande	692,2	520,2	172,0	0,172	1,64
Total		17996,7	7484,1	10512,6	10,513	100,00		
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.								
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15L/h.								

Ensayo Nº60		Pendiente: 10%				Con mantenimiento			
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes		
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)	
Fecha	Infiltración	1	1506,8	1395,4	111,4	0,111	1,02	1,02	
27/01/2011		2	1765,6	1387,7	377,9	0,378	3,47	4,50	
		3	3985,2	1380,1	2605,1	2,605	23,94	28,44	
		4	3438,7	1377,7	2061,0	2,061	18,94	47,38	
		5	6319,0	1423,0	4896,0	4,896	44,99	92,37	
		Total	17015,3	6963,9	10051,4	10,051	92,37		
		Es. Sup.	Grande	1350,2	520,2	830,0	0,830	7,63	100,00
		Total		18365,5	7484,1	10881,4	10,881	100,00	
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.									
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15L/h.									

☒ **Probeta N°2**

Ensayo Nº61		Pendiente: 0%				Sin colmatar			
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes		
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)	
Fecha	Infiltración	1	5190,1	1396,8	3793,3	3,793	36,70	36,70	
16/12/2010		2	3768,2	1391,9	2376,3	2,376	22,99	59,70	
		3	3729,3	1378,0	2351,3	2,351	22,75	82,45	
		4	2015,7	1378,5	637,2	0,637	6,17	88,62	
		5	2586,0	1422,7	1163,3	1,163	11,26	99,87	
		Total	17289,3	6967,9	10321,4	10,321	99,87		
		Es. Sup.	Grande	529,8	516,6	13,2	0,013	0,13	100,00
		Total		17819,1	7484,5	10334,6	10,335	100,00	
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.									
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15L/h.									

Ensayo Nº62		Pendiente: 3%					Sin colmatar		
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes		
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)	
Fecha	Infiltración	1	4331,7	1396,8	2934,9	2,935	27,90	27,90	
16/12/2010		2	1723,8	1391,9	331,9	0,332	3,15	31,05	
		3	3053,4	1378,0	1675,4	1,675	15,92	46,98	
		4	4615,1	1378,5	3236,6	3,237	30,76	77,74	
		5	3733,1	1422,7	2310,4	2,310	21,96	99,70	
		Total	17457,1	6967,9	10489,2	10,489	99,70		
		Es. Sup.	Grande	548,2	516,6	31,6	0,032	0,30	100,00
		Total		18005,3	7484,5	10520,8	10,521	100,00	
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.									
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15L/h.									

Ensayo Nº63		Pendiente: 5%				Sin colmatar			
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes		
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)	
Fecha	Infiltración	1	3270,1	1396,8	1873,3	1,873	17,66	17,66	
16/12/2010		2	2365,8	1391,9	973,9	0,974	9,18	26,84	
		3	3093,9	1378,0	1715,9	1,716	16,17	43,01	
		4	3785,8	1378,5	2407,3	2,407	22,69	65,70	
		5	5031,0	1422,7	3608,3	3,608	34,01	99,71	
		Total	17546,6	6967,9	10578,7	10,579	99,71		
		Es. Sup.	Grande	547,3	516,6	30,7	0,031	0,29	100,00
		Total		18093,9	7484,5	10609,4	10,609	100,00	
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.									
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15L/h.									

Ensayo Nº64		Pendiente: 7%				Sin colmatar		
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes	
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)
Fecha	Infiltración	1	1441,1	1396,8	44,3	0,044	0,40	0,40
16/12/2010		2	2067,0	1391,9	675,1	0,675	6,10	6,50
		3	3943,2	1378,0	2565,2	2,565	23,17	29,66
		4	4850,2	1378,5	3471,7	3,472	31,35	61,02
		5	5700,3	1422,7	4277,6	4,278	38,63	99,65
		Total	18001,8	6967,9	11033,9	11,034	99,65	
		Es. Sup.	Grande	555,5	516,6	38,9	0,039	0,35
Total		18557,3	7484,5	11072,8	11,073	100,00		
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.								
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15L/h.								

Ensayo Nº65		Pendiente: 10%				Sin colmatar			
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes		
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)	
Fecha	Infiltración	1	1410,9	1396,8	14,1	0,014	0,13	0,13	
16/12/2010		2	1430,8	1391,9	38,9	0,039	0,37	0,50	
		3	2500,8	1378,0	1122,8	1,123	10,55	11,05	
		4	4654,8	1378,5	3276,3	3,276	30,79	41,83	
		5	7129,2	1422,7	5706,5	5,707	53,62	95,45	
		Total	17126,5	6967,9	10158,6	10,159	95,45		
		Es. Sup.	Grande	1000,5	516,6	483,9	0,484	4,55	100,00
		Total		18127,0	7484,5	10642,5	10,643	100,00	
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.									
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15L/h.									

Ensayo Nº66		Pendiente: 0%				Colmatado al máximo (500gr)			
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes		
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)	
Fecha	Infiltración	1	5765,2	1395,4	4369,8	4,370	42,05	42,05	
23/02/2011		2	2435,3	1387,7	1047,6	1,048	10,08	52,13	
		3	3433,7	1380,1	2053,6	2,054	19,76	71,89	
		4	3251,8	1377,7	1874,1	1,874	18,03	89,93	
		5	2440,8	1423,0	1017,8	1,018	9,79	99,72	
		Total	17326,8	6963,9	10362,9	10,363	99,72		
		Es. Sup.	Grande	549,1	520,2	28,9	0,029	0,28	100,00
		Total		17875,9	7484,1	10391,8	10,392	100,00	
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.									
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15L/h.									

Ensayo Nº67		Pendiente: 3%				Colmatado al máximo (500gr)		
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes	
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)
Fecha	Infiltración      Es. Sup.	1	5034,7	1395,4	3639,3	3,639	34,79	34,79
23/02/2011		2	1682,0	1387,7	294,3	0,294	2,81	37,60
		3	3461,2	1380,1	2081,1	2,081	19,89	57,49
		4	3575,4	1377,7	2197,7	2,198	21,01	78,50
		5	3632,5	1423,0	2209,5	2,210	21,12	99,62
		Total	17385,8	6963,9	10421,9	10,422	99,62	
		Grande	560,0	520,2	39,8	0,040	0,38	100,00
		Total	17945,8	7484,1	10461,7	10,462	100,00	
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.								
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15L/h.								

Ensayo Nº68		Pendiente: 5%				Colmatado al máximo (500gr)		
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes	
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)
Fecha	Infiltración	1	2164,4	1395,4	769,0	0,769	7,28	7,28
23/02/2011		2	2571,7	1387,7	1184,0	1,184	11,21	18,49
		3	3570,7	1380,1	2190,6	2,191	20,74	39,22
		4	4115,9	1377,7	2738,2	2,738	25,92	65,14
		5	4994,1	1423,0	3571,1	3,571	33,80	98,95
		Total	17416,8	6963,9	10452,9	10,453	98,95	
		Es. Sup.	Grande	631,2	520,2	111,0	0,111	1,05
Total		18048,0	7484,1	10563,9	10,564	100,00		
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.								
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15L/h.								



Ensayo Nº69		Pendiente: 7%				Colmatado al máximo (500gr)		
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes	
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)
Fecha	Infiltración	1	1870,7	1395,4	475,3	0,475	4,46	4,46
23/02/2011		2	1586,4	1387,7	198,7	0,199	1,87	6,33
		3	3638,8	1380,1	2258,7	2,259	21,21	27,54
		4	4074,5	1377,7	2696,8	2,697	25,32	52,86
		5	6323,5	1423,0	4900,5	4,901	46,01	98,87
		Total	17493,9	6963,9	10530,0	10,530	98,87	
		Es. Sup.	Grande	640,4	520,2	120,2	0,120	1,13
Total		18134,3	7484,1	10650,2	10,650	100,00		
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.								
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15L/h.								

Ensayo Nº70		Pendiente: 10%				Colmatado al máximo (500gr)		
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes	
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)
Fecha	Infiltración	1	1397,0	1395,4	1,6	0,002	0,01	0,01
23/02/2011		2	1398,2	1387,7	10,5	0,011	0,09	0,10
		3	3022,5	1380,1	1642,4	1,642	13,80	13,91
		4	4015,8	1377,7	2638,1	2,638	22,17	36,08
		5	7781,7	1423,0	6358,7	6,359	53,45	89,53
		Total	17615,2	6963,9	10651,3	10,651	89,53	
		Es. Sup.	Grande	1766,2	520,2	1246,0	1,246	10,47
Total		19381,4	7484,1	11897,3	11,897	100,00		
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.								
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15L/h.								

Ensayo Nº71		Pendiente: 0%				Con mantenimiento			
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes		
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)	
Fecha	Infiltración	1	7301,5	1395,4	5906,1	5,906	53,82	53,82	
24/02/2011		2	2570,5	1387,7	1182,8	1,183	10,78	64,60	
		3	3164,1	1380,1	1784,0	1,784	16,26	80,85	
		4	2816,2	1377,7	1438,5	1,439	13,11	93,96	
		5	2042,2	1423,0	619,2	0,619	5,64	99,60	
		Total	17894,5	6963,9	10930,6	10,931	99,60		
		Es. Sup.	Grande	563,6	520,2	43,4	0,043	0,40	100,00
		Total		18458,1	7484,1	10974,0	10,974	100,00	
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.									
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15L/h.									

Ensayo Nº72		Pendiente: 3%				Con mantenimiento			
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes		
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)	
Fecha	Infiltración	1	4123,5	1395,4	2728,1	2,728	24,84	24,84	
24/02/2011		2	2589,8	1387,7	1202,1	1,202	10,95	35,79	
		3	3204,3	1380,1	1824,2	1,824	16,61	52,40	
		4	3850,5	1377,7	2472,8	2,473	22,52	74,92	
		5	3836,0	1423,0	2413,0	2,413	21,97	96,89	
		Total	17604,1	6963,9	10640,2	10,640	96,89		
		Es. Sup.	Grande	861,3	520,2	341,1	0,341	3,11	100,00
		Total		18465,4	7484,1	10981,3	10,981	100,00	
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.									
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15L/h.									

Ensayo Nº73		Pendiente: 5%					Con mantenimiento	
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes	
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)
Fecha	Infiltración	1	2974,6	1395,4	1579,2	1,579	14,97	14,97
24/02/2011		2	2835,1	1387,7	1447,4	1,447	13,72	28,70
		3	3309,6	1380,1	1929,5	1,930	18,30	46,99
		4	4192,2	1377,7	2814,5	2,815	26,69	73,68
		5	3989,9	1423,0	2566,9	2,567	24,34	98,02
		Total	17301,4	6963,9	10337,5	10,338	98,02	
		Es. Sup.	Grande	728,8	520,2	208,6	0,209	1,98
Total		18030,2	7484,1	10546,1	10,546	100,00		
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.								
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15L/h.								

Ensayo Nº74		Pendiente: 7%				Con mantenimiento		
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes	
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)
Fecha	Infiltración	1	1590,1	1395,4	194,7	0,195	1,80	1,80
24/02/2011		2	2441,2	1387,7	1053,5	1,054	9,73	11,53
		3	3745,1	1380,1	2365,0	2,365	21,84	33,37
		4	4236,2	1377,7	2858,5	2,859	26,40	59,76
		5	5528,8	1423,0	4105,8	4,106	37,92	97,68
		Total	17541,4	6963,9	10577,5	10,578	97,68	
		Es. Sup.	Grande	771,5	520,2	251,3	0,251	2,32
Total		18312,9	7484,1	10828,8	10,829	100,00		
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.								
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15L/h.								

Ensayo Nº75		Pendiente: 10%				Con mantenimiento		
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes	
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)
Fecha	Infiltración	1	1401,5	1395,4	6,1	0,006	0,06	0,06
24/02/2011		2	1830,7	1387,7	443,0	0,443	4,15	4,21
		3	2994,2	1380,1	1614,1	1,614	15,13	19,33
		4	4059,3	1377,7	2681,6	2,682	25,13	44,46
		5	6573,2	1423,0	5150,2	5,150	48,26	92,73
		Total	16858,9	6963,9	9895,0	9,895	92,73	
		Es. Sup.	Grande	1296,5	520,2	776,3	0,776	7,27
Total		18155,4	7484,1	10671,3	10,671	100,00		
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.								
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15L/h.								

❑ **Probeta Nº3**

Ensayo Nº76		Pendiente: 0%					Sin colmatar		
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes		
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)	
Fecha	Infiltración	1	6878,6	1396,8	5481,8	5,482	53,31	53,31	
02/03/2011		2	1857,2	1391,9	465,3	0,465	4,52	57,83	
		3	2733,2	1378,0	1355,2	1,355	13,18	71,01	
		4	2915,2	1378,5	1536,7	1,537	14,94	85,95	
		5	2867,0	1422,7	1444,3	1,444	14,04	100,00	
		Total	17251,2	6967,9	10283,3	10,283	100,00		
		Es. Sup.	Grande	516,9	516,6	0,3	0,000	0,00	100,00
		Total		17768,1	7484,5	10283,6	10,284	100,00	
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.									
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15L/h.									

Ensayo Nº77		Pendiente: 3%					Sin colmatar		
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes		
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)	
Fecha	Infiltración	1	5544,2	1396,8	4147,4	4,147	40,34	40,34	
02/03/2011		2	1944,8	1391,9	552,9	0,553	5,38	45,71	
		3	2759,5	1378,0	1381,5	1,382	13,44	59,15	
		4	2652,2	1378,5	1273,7	1,274	12,39	71,54	
		5	4313,5	1422,7	2890,8	2,891	28,12	99,65	
		Total	17214,2	6967,9	10246,3	10,246	99,65		
		Es. Sup.	Grande	552,3	516,6	35,7	0,036	0,35	100,00
		Total		17766,5	7484,5	10282,0	10,282	100,00	
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.									
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15L/h.									

Ensayo Nº78		Pendiente: 5%				Sin colmatar			
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes		
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)	
Fecha	Infiltración	1	4719,6	1396,8	3322,8	3,323	32,50	32,50	
02/03/2011		2	1790,7	1391,9	398,8	0,399	3,90	36,41	
		3	2718,4	1378,0	1340,4	1,340	13,11	49,52	
		4	3169,9	1378,5	1791,4	1,791	17,52	67,04	
		5	4730,2	1422,7	3307,5	3,308	32,35	99,40	
		Total	17128,8	6967,9	10160,9	10,161	99,40		
		Es. Sup.	Grande	578,3	516,6	61,7	0,062	0,60	100,00
		Total		17707,1	7484,5	10222,6	10,223	100,00	
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.									
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15L/h.									

Ensayo Nº79		Pendiente: 7%				Sin colmatar			
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes		
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)	
Fecha	Infiltración	1	3357,2	1396,8	1960,4	1,960	18,38	18,38	
02/03/2011		2	2116,0	1391,9	724,1	0,724	6,79	25,16	
		3	2600,5	1378,0	1222,5	1,223	11,46	36,62	
		4	3078,4	1378,5	1699,9	1,700	15,93	52,56	
		5	6414,8	1422,7	4992,1	4,992	46,79	99,35	
		Total	17566,9	6967,9	10599,0	10,599	99,35		
		Es. Sup.	Grande	586,2	516,6	69,6	0,070	0,65	100,00
		Total		18153,1	7484,5	10668,6	10,669	100,00	
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.									
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15L/h.									

Ensayo Nº80		Pendiente: 10%				Sin colmatar			
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes		
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)	
Fecha	Infiltración	1	2224,2	1396,8	827,4	0,827	7,79	7,79	
02/03/2011		2	2457,7	1391,9	1065,8	1,066	10,03	17,82	
		3	2688,8	1378,0	1310,8	1,311	12,34	30,15	
		4	3053,8	1378,5	1675,3	1,675	15,77	45,92	
		5	6795,2	1422,7	5372,5	5,373	50,56	96,48	
		Total	17219,7	6967,9	10251,8	10,252	96,48		
		Es. Sup.	Grande	890,4	516,6	373,8	0,374	3,52	100,00
		Total		18110,1	7484,5	10625,6	10,626	100,00	
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.									
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15L/h.									

Ensayo Nº81		Pendiente: 0%				Colmatado al máximo (500gr)			
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes		
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)	
Fecha	Infiltración	1	5333,4	1395,4	3938,0	3,938	37,61	37,61	
03/03/2011		2	2865,2	1387,7	1477,5	1,478	14,11	51,73	
		3	3525,9	1380,1	2145,8	2,146	20,50	72,22	
		4	3772,0	1377,7	2394,3	2,394	22,87	95,09	
		5	1850,6	1423,0	427,6	0,428	4,08	99,17	
		Total	17347,1	6963,9	10383,2	10,383	99,17		
		Es. Sup.	Grande	606,6	520,2	86,4	0,086	0,83	100,00
		Total		17953,7	7484,1	10469,6	10,470	100,00	
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.									
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15L/h.									

Ensayo Nº82		Pendiente: 3%				Colmatado al máximo (500gr)			
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes		
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)	
Fecha	Infiltración	1	5358,8	1395,4	3963,4	3,963	42,75	42,75	
03/03/2011		2	1972,3	1387,7	584,6	0,585	6,31	49,06	
		3	3220,7	1380,1	1840,6	1,841	19,85	68,91	
		4	2292,5	1377,7	914,8	0,915	9,87	78,78	
		5	3306,1	1423,0	1883,1	1,883	20,31	99,09	
		Total	16150,4	6963,9	9186,5	9,187	99,09		
		Es. Sup.	Grande	604,5	520,2	84,3	0,084	0,91	100,00
		Total		16754,9	7484,1	9270,8	9,271	100,00	
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.									
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15L/h.									

Ensayo Nº83		Pendiente: 5%				Colmatado al máximo (500gr)			
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes		
				Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)	
Fecha	Infiltración	1	3200,7	1395,4	1805,3	1,805	17,27	17,27	
03/03/2011		2	2854,4	1387,7	1466,7	1,467	14,03	31,30	
		3	3099,3	1380,1	1719,2	1,719	16,45	47,75	
		4	3366,2	1377,7	1988,5	1,989	19,02	66,77	
		5	4816,7	1423,0	3393,7	3,394	32,47	99,24	
		Total	17337,3	6963,9	10373,4	10,373	99,24		
		Es. Sup.	Grande	599,5	520,2	79,3	0,079	0,76	100,00
		Total		17936,8	7484,1	10452,7	10,453	100,00	
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.									
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15L/h.									



Ensayo Nº84		Pendiente: 7%				Colmatado al máximo (500gr)			
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes		
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)	
Fecha	Infiltración	1	1862,6	1395,4	467,2	0,467	4,45	4,45	
03/03/2011		2	2349,1	1387,7	961,4	0,961	9,16	13,61	
		3	3694,8	1380,1	2314,7	2,315	22,06	35,67	
		4	3808,5	1377,7	2430,8	2,431	23,16	58,83	
		5	5674,9	1423,0	4251,9	4,252	40,51	99,34	
		Total	17389,9	6963,9	10426,0	10,426	99,34		
		Es. Sup.	Grande	589,2	520,2	69,0	0,069	0,66	100,00
		Total		17979,1	7484,1	10495,0	10,495	100,00	
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.									
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15L/h.									

Ensayo Nº85		Pendiente: 10%				Colmatado al máximo (500gr)		
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes	
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)
Fecha	Infiltración	1	1527,7	1395,4	132,3	0,132	1,13	1,13
03/03/2011		2	1812,3	1387,7	424,6	0,425	3,61	4,74
		3	3516,5	1380,1	2136,4	2,136	18,17	22,91
		4	4316,0	1377,7	2938,3	2,938	24,99	47,90
		5	6761,9	1423,0	5338,9	5,339	45,41	93,31
		Total	17934,4	6963,9	10970,5	10,971	93,31	
		Es. Sup.	Grande	1306,5	520,2	786,3	0,786	6,69
Total		19240,9	7484,1	11756,8	11,757	100,00		
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.								
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15L/h.								

Ensayo Nº86		Pendiente: 0%				Con mantenimiento		
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes	
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)
Fecha	Infiltración      Es. Sup.	1	5625,4	1395,4	4230,0	4,230	41,63	41,63
04/03/2011		2	2984,3	1387,7	1596,6	1,597	15,71	57,35
		3	2847,5	1380,1	1467,4	1,467	14,44	71,79
		4	3235,6	1377,7	1857,9	1,858	18,29	90,08
		5	2319,4	1423,0	896,4	0,896	8,82	98,90
		Total	17012,2	6963,9	10048,3	10,048	98,90	
		Total	632,2	520,2	112,0	0,112	1,10	100,00
Total		17644,4	7484,1	10160,3	10,160	100,00		
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.								
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15L/h.								

Ensayo Nº87		Pendiente: 3%				Con mantenimiento			
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes		
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)	
Fecha	Infiltración	1	4768,4	1395,4	3373,0	3,373	33,28	33,28	
04/03/2011		2	2168,0	1387,7	780,3	0,780	7,70	40,97	
		3	3161,7	1380,1	1781,6	1,782	17,58	58,55	
		4	3641,4	1377,7	2263,7	2,264	22,33	80,88	
		5	3259,8	1423,0	1836,8	1,837	18,12	99,00	
		Total	16999,3	6963,9	10035,4	10,035	99,00		
		Es. Sup.	Grande	621,3	520,2	101,1	0,101	1,00	100,00
		Total		17620,6	7484,1	10136,5	10,137	100,00	
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.									
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15L/h.									

Ensayo Nº88		Pendiente: 5%					Con mantenimiento		
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes		
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)	
Fecha	Infiltración	1	3714,7	1395,4	2319,3	2,319	22,53	22,53	
04/03/2011		2	2449,3	1387,7	1061,6	1,062	10,31	32,84	
		3	3317,5	1380,1	1937,4	1,937	18,82	51,66	
		4	3516,4	1377,7	2138,7	2,139	20,78	72,44	
		5	4148,8	1423,0	2725,8	2,726	26,48	98,92	
		Total	17146,7	6963,9	10182,8	10,183	98,92		
		Es. Sup.	Grande	631,3	520,2	111,1	0,111	1,08	100,00
		Total		17778,0	7484,1	10293,9	10,294	100,00	
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.									
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15L/h.									

Ensayo Nº89		Pendiente: 7%				Con mantenimiento			
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes		
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)	
Fecha	Infiltración	1	2319,1	1395,4	923,7	0,924	8,73	8,73	
04/03/2011		2	2454,7	1387,7	1067,0	1,067	10,08	18,80	
		3	3634,6	1380,1	2254,5	2,255	21,30	40,10	
		4	3774,4	1377,7	2396,7	2,397	22,64	62,74	
		5	5284,1	1423,0	3861,1	3,861	36,47	99,22	
		Total	17466,9	6963,9	10503,0	10,503	99,22		
		Es. Sup.	Grande	603,3	520,2	83,1	0,083	0,78	100,00
		Total		18070,2	7484,1	10586,1	10,586	100,00	
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.									
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15L/h.									

Ensayo Nº90		Pendiente: 10%				Con mantenimiento			
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes		
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)	
Fecha	Infiltración	1	1714,4	1395,4	319,0	0,319	2,73	2,73	
04/03/2011		2	1687,2	1387,7	299,5	0,300	2,56	5,28	
		3	3652,8	1380,1	2272,7	2,273	19,42	24,70	
		4	4083,7	1377,7	2706,0	2,706	23,12	47,82	
		5	6860,7	1423,0	5437,7	5,438	46,45	94,27	
		Total	17998,8	6963,9	11034,9	11,035	94,27		
		Es. Sup.	Grande	1190,9	520,2	670,7	0,671	5,73	100,00
		Total		19189,7	7484,1	11705,6	11,706	100,00	
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.									
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15L/h.									

## PAVIMENTOS PERMEABLES CON SUPERFICIES DE ASFALTO POROSO

## □ Probeta N°1

Ensayo Nº91		Pendiente: 0%				Sin colmatar			
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes		
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)	
Fecha	Infiltración	1	3226,9	1396,8	1830,1	1,830	17,05	17,05	
03/12/2010		2	4373,9	1391,9	2982,0	2,982	27,77	44,82	
		3	4702,7	1378,0	3324,7	3,325	30,97	75,79	
		4	3617,4	1378,5	2238,9	2,239	20,85	96,64	
		5	1691,1	1422,7	268,4	0,268	2,50	99,14	
		Total	17612,0	6967,9	10644,1	10,644	99,14		
		Es. Sup.	Grande	608,9	516,6	92,3	0,092	0,86	100,00
		Total		18220,9	7484,5	10736,4	10,736	100,00	
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.									
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15L/h.									

Ensayo Nº92		Pendiente: 3%				Sin colmatar			
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes		
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)	
Fecha	Infiltración	1	1924,7	1395,4	529,3	0,529	5,02	5,02	
03/12/2010		2	2930,8	1387,7	1543,1	1,543	14,65	19,67	
		3	4150,4	1380,1	2770,3	2,770	26,30	45,97	
		4	5115,3	1377,7	3737,6	3,738	35,48	81,45	
		5	3256,7	1423,0	1833,7	1,834	17,41	98,86	
		Total	17377,9	6963,9	10414,0	10,414	98,86		
		Es. Sup.	Grande	640,5	520,2	120,3	0,120	1,14	100,00
		Total		18018,4	7484,1	10534,3	10,534	100,00	
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.									
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15L/h.									

Ensayo Nº93		Pendiente: 5%				Sin colmatar		
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes	
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)
Fecha	Infiltración	1	1850,5	1395,4	455,1	0,455	4,30	4,30
03/12/2010		2	2426,0	1387,7	1038,3	1,038	9,80	14,10
		3	2334,7	1380,1	954,6	0,955	9,01	23,10
		4	4938,5	1377,7	3560,8	3,561	33,61	56,71
		5	5870,5	1423,0	4447,5	4,448	41,98	98,69
		Total	17420,2	6963,9	10456,3	10,456	98,69	
		Es. Sup.	Grande	659,1	520,2	138,9	0,139	1,31
Total		18079,3	7484,1	10595,2	10,595	100,00		
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.								
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15L/h.								

Ensayo Nº94		Pendiente: 7%				Sin colmatar		
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes	
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)
Fecha	Infiltración	1	1409,5	1395,4	14,1	0,014	0,13	0,13
03/12/2010		2	1557,7	1387,7	170,0	0,170	1,57	1,71
		3	2514,6	1380,1	1134,5	1,135	10,51	12,21
		4	4924,8	1377,7	3547,1	3,547	32,85	45,07
		5	7190,2	1423,0	5767,2	5,767	53,42	98,48
		Total	17596,8	6963,9	10632,9	10,633	98,48	
		Es. Sup.	Grande	684,2	520,2	164,0	0,164	1,52
Total		18281,0	7484,1	10796,9	10,797	100,00		
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.								
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15L/h.								

<b>Ensayo Nº95</b>		Pendiente: 10%				Sin colmatar		
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes	
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)
Fecha	03/12/2010	1	1400,0	1395,4	4,6	0,005	0,05	0,05
		2	1400,0	1387,7	12,3	0,012	0,12	0,17
		3	1596,4	1380,1	216,3	0,216	2,13	2,30
		4	3294,8	1377,7	1917,1	1,917	18,88	21,18
		5	9201,2	1423,0	7778,2	7,778	76,62	97,80
		<b>Total</b>	16892,4	6963,9	9928,5	<b>9,929</b>	<b>97,80</b>	
		Es. Sup. <b>Grande</b>	743,9	520,2	223,7	<b>0,224</b>	<b>2,20</b>	100,00
		<b>Total</b>	17636,3	7484,1	10152,2	<b>10,152</b>	100,00	
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.								
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15L/h.								

<b>Ensayo Nº96</b>		Pendiente: 0%				Colmatado al máximo (500gr)		
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes	
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)
Fecha	20/01/2011	1	4630,2	1395,4	3234,8	3,235	29,35	29,35
		2	4566,0	1387,7	3178,3	3,178	28,84	58,19
		3	3625,9	1380,1	2245,8	2,246	20,38	78,56
		4	3547,4	1377,7	2169,7	2,170	19,69	98,25
		5	1533,2	1423,0	110,2	0,110	1,00	99,25
		<b>Total</b>	17902,7	6963,9	10938,8	<b>10,939</b>	<b>99,25</b>	
		Es. Sup. <b>Grande</b>	603,3	520,2	83,1	<b>0,083</b>	<b>0,75</b>	100,00
		<b>Total</b>	18506,0	7484,1	11021,9	<b>11,022</b>	100,00	
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.								
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15L/h.								

Ensayo Nº97		Pendiente: 3%				Colmatado al máximo (500gr)		
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes	
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)
Fecha	Infiltración	1	1875,9	1395,4	480,5	0,481	4,32	4,32
20/01/2011		2	4525,3	1387,7	3137,6	3,138	28,21	32,53
		3	4233,7	1380,1	2853,6	2,854	25,66	58,19
		4	4320,1	1377,7	2942,4	2,942	26,46	84,64
		5	3026,7	1423,0	1603,7	1,604	14,42	99,06
		Total	17981,7	6963,9	11017,8	11,018	99,06	
		Es. Sup.	Grande	624,5	520,2	104,3	0,104	0,94
Total		18606,2	7484,1	11122,1	11,122	100,00		
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.								
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15L/h.								

Ensayo Nº98		Pendiente: 5%				Colmatado al máximo (500gr)		
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes	
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)
Fecha	Infiltración	1	1721,3	1395,4	325,9	0,326	2,97	2,97
20/01/2011		2	2899,4	1387,7	1511,7	1,512	13,79	16,76
		3	4376,2	1380,1	2996,1	2,996	27,32	44,08
		4	4320,5	1377,7	2942,8	2,943	26,84	70,91
		5	4439,0	1423,0	3016,0	3,016	27,50	98,42
		Total	17756,4	6963,9	10792,5	10,793	98,42	
		Es. Sup.	Grande	693,9	520,2	173,7	0,174	1,58
Total		18450,3	7484,1	10966,2	10,966	100,00		
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.								
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15L/h.								



Ensayo Nº99		Pendiente: 7%				Colmatado al máximo (500gr)		
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes	
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)
Fecha	Infiltración	1	1438,9	1395,4	43,5	0,044	0,41	0,41
20/01/2011		2	1942,5	1387,7	554,8	0,555	5,18	5,58
		3	4249,3	1380,1	2869,2	2,869	26,77	32,36
		4	4296,2	1377,7	2918,5	2,919	27,23	59,59
		5	5577,2	1423,0	4154,2	4,154	38,76	98,35
		Total	17504,1	6963,9	10540,2	10,540	98,35	
		Es. Sup.	Grande	696,8	520,2	176,6	0,177	1,65
Total		18200,9	7484,1	10716,8	10,717	100,00		
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.								
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15L/h.								

Ensayo Nº100		Pendiente: 10%				Colmatado al máximo (500gr)		
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes	
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)
Fecha	Infiltración	1	1404,1	1395,4	8,7	0,009	0,09	0,09
20/01/2011		2	1394,1	1387,7	6,4	0,006	0,07	0,16
		3	2315,2	1380,1	935,1	0,935	9,88	10,04
		4	4256,7	1377,7	2879,0	2,879	30,43	40,48
		5	6836,2	1423,0	5413,2	5,413	57,22	97,70
		Total	16206,3	6963,9	9242,4	9,242	97,70	
		Es. Sup. Grande	738,2	520,2	218,0	0,218	2,30	100,00
Total		16944,5	7484,1	9460,4	9,460	100,00		
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.								
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15L/h.								
Notas:								

Ensayo Nº101		Pendiente: 0%				Con mantenimiento			
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes		
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)	
Fecha	Infiltración	1	6351,5	1395,4	4956,1	4,956	47,03	47,03	
27/01/2011		2	3431,9	1387,7	2044,2	2,044	19,40	66,43	
		3	3243,5	1380,1	1863,4	1,863	17,68	84,12	
		4	2775,2	1377,7	1397,5	1,398	13,26	97,38	
		5	1567,5	1423,0	144,5	0,145	1,37	98,75	
		Total	17369,6	6963,9	10405,7	10,406	98,75		
		Es. Sup.	Grande	651,8	520,2	131,6	0,132	1,25	100,00
		Total		18021,4	7484,1	10537,3	10,537	100,00	
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.									
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15L/h.									

Ensayo Nº102		Pendiente: 3%				Con mantenimiento			
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes		
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)	
Fecha	Infiltración	1	3778,1	1395,4	2382,7	2,383	21,56	21,56	
27/01/2011		2	4203,4	1387,7	2815,7	2,816	25,48	47,04	
		3	3767,4	1380,1	2387,3	2,387	21,60	68,64	
		4	3492,3	1377,7	2114,6	2,115	19,13	87,78	
		5	2641,4	1423,0	1218,4	1,218	11,03	98,80	
		Total	17882,6	6963,9	10918,7	10,919	98,80		
		Es. Sup.	Grande	652,5	520,2	132,3	0,132	1,20	100,00
		Total		18535,1	7484,1	11051,0	11,051	100,00	
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.									
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15L/h.									

Ensayo Nº103		Pendiente: 5%				Con mantenimiento			
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes		
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)	
Fecha	Infiltración	1	1915,2	1395,4	519,8	0,520	5,10	5,10	
27/01/2011		2	3710,6	1387,7	2322,9	2,323	22,78	27,88	
		3	4192,6	1380,1	2812,5	2,813	27,59	55,47	
		4	3546,7	1377,7	2169,0	2,169	21,27	76,74	
		5	3641,0	1423,0	2218,0	2,218	21,76	98,50	
		Total	17006,1	6963,9	10042,2	10,042	98,50		
		Es. Sup.	Grande	673,3	520,2	153,1	0,153	1,50	100,00
		Total		17679,4	7484,1	10195,3	10,195	100,00	
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.									
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15L/h.									

Ensayo Nº104		Pendiente: 7%				Con mantenimiento		
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes	
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)
Fecha	Infiltración	1	1574,0	1395,4	178,6	0,179	1,74	1,74
27/01/2011		2	2909,4	1387,7	1521,7	1,522	14,84	16,58
		3	4315,6	1380,1	2935,5	2,936	28,63	45,22
		4	3586,6	1377,7	2208,9	2,209	21,54	66,76
		5	4692,5	1423,0	3269,5	3,270	31,89	98,65
		Total	17078,1	6963,9	10114,2	10,114	98,65	
		Es. Sup.	Grande	658,5	520,2	138,3	0,138	1,35
Total		17736,6	7484,1	10252,5	10,253	100,00		
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.								
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15L/h.								

Ensayo Nº105		Pendiente: 10%				Con mantenimiento		
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes	
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)
Fecha	Infiltración	1	1539,8	1395,4	144,4	0,144	1,30	1,30
27/01/2011		2	1875,2	1387,7	487,5	0,488	4,38	5,68
		3	4415,2	1380,1	3035,1	3,035	27,29	32,97
		4	3680,2	1377,7	2302,5	2,303	20,70	53,67
		5	6335,4	1423,0	4912,4	4,912	44,16	97,83
		Total	17845,8	6963,9	10881,9	10,882	97,83	
		Es. Sup.	Grande	761,8	520,2	241,6	0,242	2,17
Total		18607,6	7484,1	11123,5	11,124	100,00		
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.								
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15L/h.								

□ **Probeta N°2**

Ensayo Nº106		Pendiente: 0%				Sin colmatar			
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes		
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)	
Fecha	Infiltración	1	4384,3	1396,8	2987,5	2,988	26,93	26,93	
16/12/2010		2	4724,1	1391,9	3332,2	3,332	30,04	56,98	
		3	4411,2	1378,0	3033,2	3,033	27,35	84,32	
		4	3032,5	1378,5	1654,0	1,654	14,91	99,23	
		5	1428,6	1422,7	5,9	0,006	0,05	99,29	
		Total	17980,7	6967,9	11012,8	11,013	99,29		
		Es. Sup.	Grande	595,6	516,6	79,0	0,079	0,71	100,00
		Total		18576,3	7484,5	11091,8	11,092	100,00	
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.									
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15L/h.									

Ensayo Nº107		Pendiente: 3%				Sin colmatar			
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes		
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)	
Fecha	Infiltración	1	1542,6	1396,8	145,8	0,146	1,29	1,29	
16/12/2010		2	2451,5	1391,9	1059,6	1,060	9,34	10,63	
		3	4942,7	1378,0	3564,7	3,565	31,43	42,06	
		4	5764,8	1378,5	4386,3	4,386	38,68	80,74	
		5	3418,5	1422,7	1995,8	1,996	17,60	98,33	
		Total	18120,1	6967,9	11152,2	11,152	98,33		
		Es. Sup.	Grande	705,5	516,6	188,9	0,189	1,67	100,00
		Total		18825,6	7484,5	11341,1	11,341	100,00	
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.									
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15L/h.									

Ensayo Nº108		Pendiente: 5%				Sin colmatar			
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes		
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)	
Fecha	Infiltración	1	1526,8	1396,8	130,0	0,130	1,33	1,33	
16/12/2010		2	1460,9	1391,9	69,0	0,069	0,71	2,04	
		3	2435,4	1378,0	1057,4	1,057	10,85	12,89	
		4	5688,3	1378,5	4309,8	4,310	44,20	57,09	
		5	5446,2	1422,7	4023,5	4,024	41,27	98,35	
		Total	16557,6	6967,9	9589,7	9,590	98,35		
		Es. Sup.	Grande	677,0	516,6	160,4	0,160	1,65	100,00
		Total		17234,6	7484,5	9750,1	9,750	100,00	
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.									
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15L/h.									

Ensayo Nº109		Pendiente: 7%				Sin colmatar		
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes	
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)
Fecha	Infiltración	1	1404,2	1396,8	7,4	0,007	0,08	0,08
16/12/2010		2	1452,2	1391,9	60,3	0,060	0,63	0,70
		3	1736,6	1378,0	358,6	0,359	3,73	4,44
		4	4998,9	1378,5	3620,4	3,620	37,68	42,12
		5	6717,8	1422,7	5295,1	5,295	55,11	97,23
		Total	16309,7	6967,9	9341,8	9,342	97,23	
		Es. Sup.	Grande	782,6	516,6	266,0	0,266	2,77
Total		17092,3	7484,5	9607,8	9,608	100,00		
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.								
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15L/h.								

Ensayo Nº110		Pendiente: 10%				Sin colmatar		
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes	
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)
Fecha	Infiltración	1	1396,9	1396,8	0,1	0,000	0,00	0,00
16/12/2010		2	1397,0	1391,9	5,1	0,005	0,05	0,05
		3	1592,0	1378,0	214,0	0,214	2,16	2,21
		4	4230,0	1378,5	2851,5	2,852	28,75	30,96
		5	7627,7	1422,7	6205,0	6,205	62,56	93,53
		Total	16243,6	6967,9	9275,7	9,276	93,53	
		Es. Sup.	Grande	1158,7	516,6	642,1	0,642	6,47
Total		17402,3	7484,5	9917,8	9,918	100,00		
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.								
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15L/h.								

Ensayo Nº111		Pendiente: 0%				Colmatado al máximo (402,3gr)			
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes		
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)	
Fecha	Infiltración	1	1674,1	1395,4	278,7	0,279	2,49	2,49	
22/06/2012		2	4062,5	1387,7	2674,8	2,675	23,93	26,42	
		3	5508,0	1380,1	4127,9	4,128	36,93	63,36	
		4	5004,5	1377,7	3626,8	3,627	32,45	95,80	
		5	1709,4	1423,0	286,4	0,286	2,56	98,37	
		Total	17958,5	6963,9	10994,6	10,995	98,37		
		Es. Sup.	Grande	702,7	520,2	182,5	0,183	1,63	100,00
		Total		18661,2	7484,1	11177,1	11,177	100,00	
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.									
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15L/h.									

Ensayo Nº112		Pendiente: 3%				Colmatado al máximo (500gr)		
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes	
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)
Fecha	Infiltración	1	1401,4	1395,4	6,0	0,006	0,06	0,06
25/06/2012		2	2988,1	1387,7	1600,4	1,600	15,45	15,51
		3	4086,4	1380,1	2706,3	2,706	26,13	41,64
		4	4311,0	1377,7	2933,3	2,933	28,32	69,95
		5	3929,3	1423,0	2506,3	2,506	24,20	94,15
		Total	16716,2	6963,9	9752,3	9,752	94,15	
		Es. Sup.	Grande	1126,0	520,2	605,8	0,606	5,85
Total		17842,2	7484,1	10358,1	10,358	100,00		
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.								
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15L/h.								

Ensayo Nº113		Pendiente: 5%				Colmatado al máximo (500gr)		
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes	
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)
Fecha	Infiltración	1	1411,9	1395,4	16,5	0,017	0,15	0,15
22/06/2012		2	1669,5	1387,7	281,8	0,282	2,55	2,70
		3	3104,8	1380,1	1724,7	1,725	15,60	18,30
		4	4425,6	1377,7	3047,9	3,048	27,57	45,87
		5	7089,8	1423,0	5666,8	5,667	51,25	97,12
		Total	17701,6	6963,9	10737,7	10,738	97,12	
		Es. Sup.	Grande	838,6	520,2	318,4	0,318	2,88
Total		18540,2	7484,1	11056,1	11,056	100,00		
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.								
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15L/h.								



Ensayo Nº114		Pendiente: 7%					Colmatado al máximo (500gr)	
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes	
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)
Fecha	Infiltración	1	1396,2	1395,4	0,8	0,001	0,01	0,01
22/06/2012		2	1390,1	1387,7	2,4	0,002	0,02	0,03
		3	1911,9	1380,1	531,8	0,532	5,14	5,17
		4	3724,0	1377,7	2346,3	2,346	22,66	27,82
		5	8278,2	1423,0	6855,2	6,855	66,20	94,02
		Total	16700,4	6963,9	9736,5	9,737	94,02	
		Es. Sup.	Grande	1139,0	520,2	618,8	0,619	5,98
Total		17839,4	7484,1	10355,3	10,355	100,00		
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.								
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15L/h.								

Ensayo Nº115		Pendiente: 10%				Colmatado al máximo (500gr)			
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes		
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)	
Fecha	Infiltración	1	1396,7	1395,4	1,3	0,001	0,01	0,01	
22/06/2012		2	1392,0	1387,7	4,3	0,004	0,04	0,05	
		3	1475,3	1380,1	95,2	0,095	0,87	0,92	
		4	2598,6	1377,7	1220,9	1,221	11,19	12,11	
		5	9578,7	1423,0	8155,7	8,156	74,73	86,84	
		Total	16441,3	6963,9	9477,4	9,477	86,84		
		Es. Sup.	Grande	1956,6	520,2	1436,4	1,436	13,16	100,00
		Total		18397,9	7484,1	10913,8	10,914	100,00	
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.									
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15L/h.									

Ensayo Nº116		Pendiente: 0%				Con mantenimiento (36gr)		
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes	
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)
Fecha	Infiltración	1	3666,9	1395,4	2271,5	2,272	22,09	22,09
24/02/2011		2	5248,4	1387,7	3860,7	3,861	37,55	59,65
		3	3609,4	1380,1	2229,3	2,229	21,68	81,33
		4	2925,1	1377,7	1547,4	1,547	15,05	96,38
		5	1629,1	1423,0	206,1	0,206	2,00	98,39
		Total	17078,9	6963,9	10115,0	10,115	98,39	
		Es. Sup.	Grande	686,2	520,2	166,0	0,166	1,61
Total		17765,1	7484,1	10281,0	10,281	100,00		
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.								
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15L/h.								

Ensayo Nº117		Pendiente: 3%				Con mantenimiento			
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes		
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)	
Fecha	Infiltración	1	1478,7	1395,4	83,3	0,083	0,77	0,77	
24/02/2011		2	3814,7	1387,7	2427,0	2,427	22,38	23,15	
		3	4392,7	1380,1	3012,6	3,013	27,78	50,93	
		4	4002,6	1377,7	2624,9	2,625	24,20	75,13	
		5	3793,6	1423,0	2370,6	2,371	21,86	96,99	
		Total	17482,3	6963,9	10518,4	10,518	96,99		
		Es. Sup.	Grande	846,5	520,2	326,3	0,326	3,01	100,00
		Total		18328,8	7484,1	10844,7	10,845	100,00	
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.									
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15L/h.									

Ensayo Nº118		Pendiente: 5%				Con mantenimiento			
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes		
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)	
Fecha	Infiltración	1	1401,8	1395,4	6,4	0,006	0,06	0,06	
24/02/2011		2	3278,5	1387,7	1890,8	1,891	16,84	16,90	
		3	3908,1	1380,1	2528,0	2,528	22,52	39,42	
		4	3491,3	1377,7	2113,6	2,114	18,83	58,24	
		5	5713,1	1423,0	4290,1	4,290	38,21	96,46	
		Total	17792,8	6963,9	10828,9	10,829	96,46		
		Es. Sup.	Grande	918,1	520,2	397,9	0,398	3,54	100,00
		Total		18710,9	7484,1	11226,8	11,227	100,00	
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.									
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15L/h.									

Ensayo Nº119		Pendiente: 7%				Con mantenimiento			
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes		
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)	
Fecha	Infiltración	1	1402,3	1395,4	6,9	0,007	0,07	0,07	
24/02/2011		2	1669,0	1387,7	281,3	0,281	2,76	2,82	
		3	2900,3	1380,1	1520,2	1,520	14,90	17,72	
		4	3502,8	1377,7	2125,1	2,125	20,83	38,55	
		5	7005,3	1423,0	5582,3	5,582	54,70	93,25	
		Total	16479,7	6963,9	9515,8	9,516	93,25		
		Es. Sup.	Grande	1208,9	520,2	688,7	0,689	6,75	100,00
		Total		17688,6	7484,1	10204,5	10,205	100,00	
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.									
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15L/h.									

Ensayo Nº120		Pendiente: 10%				Con mantenimiento		
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes	
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)
Fecha	Infiltración	1	1396,0	1395,4	0,6	0,001	0,01	0,01
24/02/2011		2	1391,5	1387,7	3,8	0,004	0,04	0,04
		3	2087,4	1380,1	707,3	0,707	6,65	6,69
		4	2795,2	1377,7	1417,5	1,418	13,33	20,03
		5	8282,7	1423,0	6859,7	6,860	64,52	84,55
		Total	15952,8	6963,9	8988,9	8,989	84,55	
		Es. Sup.	Grande	2162,5	520,2	1642,3	1,642	15,45
Total		18115,3	7484,1	10631,2	10,631	100,00		
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.								
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15L/h.								

❑ Probeta N°3

Ensayo Nº121		Pendiente: 0%				Sin colmatar		
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes	
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)
Fecha	Infiltración	1	6378,9	1396,8	4982,1	4,982	50,23	50,23
02/03/2011		2	2287,4	1391,9	895,5	0,896	9,03	59,25
		3	3801,5	1378,0	2423,5	2,424	24,43	83,68
		4	2726,1	1378,5	1347,6	1,348	13,59	97,27
		5	1676,8	1422,7	254,1	0,254	2,56	99,83
		Total	16870,7	6967,9	9902,8	9,903	99,83	
		Es. Sup. Grande	533,3	516,6	16,7	0,017	0,17	100,00
		Total	17404,0	7484,5	9919,5	9,920	100,00	
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.								
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15L/h.								

Ensayo Nº122		Pendiente: 3%				Sin colmatar			
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes		
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)	
Fecha	Infiltración	1	4416,7	1396,8	3019,9	3,020	28,39	28,39	
02/03/2011		2	2080,3	1391,9	688,4	0,688	6,47	34,86	
		3	4076,9	1378,0	2698,9	2,699	25,37	60,23	
		4	3151,6	1378,5	1773,1	1,773	16,67	76,90	
		5	3752,2	1422,7	2329,5	2,330	21,90	98,79	
		Total	17477,7	6967,9	10509,8	10,510	98,79		
		Es. Sup.	Grande	644,9	516,6	128,3	0,128	1,21	100,00
		Total		18122,6	7484,5	10638,1	10,638	100,00	
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.									
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15L/h.									

Ensayo Nº123		Pendiente: 5%				Sin colmatar		
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes	
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)
Fecha	Infiltración	1	2590,6	1396,8	1193,8	1,194	10,63	10,63
02/03/2011		2	2350,2	1391,9	958,3	0,958	8,53	19,17
		3	4150,7	1378,0	2772,7	2,773	24,69	43,86
		4	3700,3	1378,5	2321,8	2,322	20,68	64,54
		5	5280,6	1422,7	3857,9	3,858	34,36	98,90
		Total	18072,4	6967,9	11104,5	11,105	98,90	
		Es. Sup.	Grande	640,5	516,6	123,9	0,124	1,10
Total		18712,9	7484,5	11228,4	11,228	100,00		
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.								
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15L/h.								

Ensayo Nº124		Pendiente: 7%				Sin colmatar		
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes	
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)
Fecha	Infiltración	1	1750,8	1396,8	354,0	0,354	3,38	3,38
02/03/2011		2	1889,4	1391,9	497,5	0,498	4,75	8,13
		3	3598,5	1378,0	2220,5	2,221	21,21	29,34
		4	3262,6	1378,5	1884,1	1,884	18,00	47,34
		5	6816,6	1422,7	5393,9	5,394	51,52	98,85
		Total	17317,9	6967,9	10350,0	10,350	98,85	
		Es. Sup.	Grande	636,5	516,6	119,9	0,120	1,15
Total		17954,4	7484,5	10469,9	10,470	100,00		
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.								
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15L/h.								

Ensayo Nº125		Pendiente: 10%				Sin colmatar		
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes	
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)
Fecha	Infiltración	1	1406,6	1396,8	9,8	0,010	0,10	0,10
02/03/2011		2	1454,7	1391,9	62,8	0,063	0,63	0,73
		3	2425,7	1378,0	1047,7	1,048	10,49	11,22
		4	3007,2	1378,5	1628,7	1,629	16,31	27,52
		5	8017,1	1422,7	6594,4	6,594	66,02	93,54
		Total	16311,3	6967,9	9343,4	9,343	93,54	
		Es. Sup.	Grande	1162,0	516,6	645,4	0,645	6,46
Total		17473,3	7484,5	9988,8	9,989	100,00		
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.								
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15L/h.								

Ensayo Nº126		Pendiente: 0%				Colmatado al máximo (500gr)			
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes		
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)	
Fecha	Infiltración	1	3661,5	1395,4	2266,1	2,266	21,46	21,46	
03/03/2011		2	4277,3	1387,7	2889,6	2,890	27,37	48,83	
		3	4917,8	1380,1	3537,7	3,538	33,51	82,34	
		4	3101,2	1377,7	1723,5	1,724	16,32	98,67	
		5	1513,6	1423,0	90,6	0,091	0,86	99,52	
		Total	17471,4	6963,9	10507,5	10,508	99,52		
		Es. Sup.	Grande	570,4	520,2	50,2	0,050	0,48	100,00
		Total		18041,8	7484,1	10557,7	10,558	100,00	
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.									
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15L/h.									

Ensayo Nº127		Pendiente: 3%				Colmatado al máximo (500gr)		
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes	
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)
Fecha	Infiltración	1	1785,3	1395,4	389,9	0,390	3,64	3,64
03/03/2011		2	3317,5	1387,7	1929,8	1,930	18,01	21,65
		3	5354,2	1380,1	3974,1	3,974	37,08	58,73
		4	4099,7	1377,7	2722,0	2,722	25,40	84,13
		5	3007,2	1423,0	1584,2	1,584	14,78	98,91
		Total	17563,9	6963,9	10600,0	10,600	98,91	
		Es. Sup.	Grande	637,0	520,2	116,8	0,117	1,09
Total		18200,9	7484,1	10716,8	10,717	100,00		
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.								
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15L/h.								

Ensayo Nº128		Pendiente: 5%				Colmatado al máximo (500gr)		
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes	
				Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)
Fecha	Infiltración	1	1551,1	1395,4	155,7	0,156	1,54	1,54
03/03/2011		2	2077,1	1387,7	689,4	0,689	6,83	8,38
		3	3998,1	1380,1	2618,0	2,618	25,95	34,33
		4	4518,1	1377,7	3140,4	3,140	31,13	65,46
		5	3984,2	1423,0	2561,2	2,561	25,39	90,84
		Total	16128,6	6963,9	9164,7	9,165	90,84	
		Es. Sup.	Grande	1444,0	520,2	923,8	0,924	9,16
Total		17572,6	7484,1	10088,5	10,089	100,00		
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.								
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15L/h.								



Ensayo Nº129		Pendiente: 7%				Colmatado al máximo (500gr)		
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes	
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)
Fecha	Infiltración	1	1395,4	1395,4	0,0	0,000	0,00	0,00
03/03/2011		2	1577,3	1387,7	189,6	0,190	1,86	1,86
		3	3544,7	1380,1	2164,6	2,165	21,22	23,07
		4	4240,1	1377,7	2862,4	2,862	28,06	51,13
		5	5341,8	1423,0	3918,8	3,919	38,41	89,54
		Total	16099,3	6963,9	9135,4	9,135	89,54	
		Es. Sup.	Grande	1587,6	520,2	1067,4	1,067	10,46
Total		17686,9	7484,1	10202,8	10,203	100,00		
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.								
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15L/h.								

Ensayo Nº130		Pendiente: 10%				Colmatado al máximo (500gr)		
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes	
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)
Fecha	Infiltración	1	1395,4	1395,4	0,0	0,000	0,00	0,00
03/03/2011		2	1469,3	1387,7	81,6	0,082	0,81	0,81
		3	2128,8	1380,1	748,7	0,749	7,45	8,26
		4	4075,8	1377,7	2698,1	2,698	26,85	35,11
		5	6130,9	1423,0	4707,9	4,708	46,85	81,96
		Total	15200,2	6963,9	8236,3	8,236	81,96	
		Es. Sup.	Grande	2332,7	520,2	1812,5	1,813	18,04
Total		17532,9	7484,1	10048,8	10,049	100,00		
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.								
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15L/h.								

Ensayo Nº131		Pendiente: 0%				Con mantenimiento (52,5gr)		
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes	
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)
Fecha	Infiltración	1	3203,7	1395,4	1808,3	1,808	18,30	18,30
04/03/2011		2	3100,3	1387,7	1712,6	1,713	17,33	35,63
		3	4286,4	1380,1	2906,3	2,906	29,41	65,05
		4	3815,0	1377,7	2437,3	2,437	24,67	89,72
		5	2362,9	1423,0	939,9	0,940	9,51	99,23
		Total	16768,3	6963,9	9804,4	9,804	99,23	
		Es. Sup.	Grande	596,5	520,2	76,3	0,076	0,77
Total		17364,8	7484,1	9880,7	9,881	100,00		
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.								
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15L/h.								

Ensayo Nº132		Pendiente: 3%				Con mantenimiento			
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes		
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)	
Fecha	Infiltración	1	1407,7	1395,4	12,3	0,012	0,13	0,13	
04/03/2011		2	2118,7	1387,7	731,0	0,731	7,44	7,57	
		3	3910,9	1380,1	2530,8	2,531	25,76	33,33	
		4	3225,9	1377,7	1848,2	1,848	18,82	52,15	
		5	3104,3	1423,0	1681,3	1,681	17,12	69,26	
		Total	13767,5	6963,9	6803,6	6,804	69,26		
		Es. Sup.	Grande	3539,3	520,2	3019,1	3,019	30,74	100,00
		Total		17306,8	7484,1	9822,7	9,823	100,00	
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.									
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15L/h.									

Ensayo Nº133		Pendiente: 5%				Con mantenimiento		
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes	
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)
Fecha	Infiltración	1	1396,3	1395,4	0,9	0,001	0,01	0,01
04/03/2011		2	1524,7	1387,7	137,0	0,137	1,40	1,41
		3	3411,6	1380,1	2031,5	2,032	20,71	22,11
		4	2801,2	1377,7	1423,5	1,424	14,51	36,62
		5	3379,1	1423,0	1956,1	1,956	19,94	56,56
		Total	12512,9	6963,9	5549,0	5,549	56,56	
		Es. Sup.	Grande	4781,9	520,2	4261,7	4,262	43,44
Total		17294,8	7484,1	9810,7	9,811	100,00		
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.								
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15L/h.								

Ensayo Nº134		Pendiente: 7%				Con mantenimiento			
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes		
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)	
Fecha	Infiltración	1	1395,5	1395,4	0,1	0,000	0,00	0,00	
04/03/2011		2	1561,8	1387,7	174,1	0,174	1,78	1,78	
		3	3353,5	1380,1	1973,4	1,973	20,17	21,95	
		4	3091,3	1377,7	1713,6	1,714	17,51	39,46	
		5	4116,2	1423,0	2693,2	2,693	27,53	66,99	
		Total	13518,3	6963,9	6554,4	6,554	66,99		
		Es. Sup.	Grande	3750,2	520,2	3230,0	3,230	33,01	100,00
		Total		17268,5	7484,1	9784,4	9,784	100,00	
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.									
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15L/h.									

Ensayo Nº135		Pendiente: 10%				Con mantenimiento			
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes		
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)	
Fecha	Infiltración	1	1396,8	1395,4	1,4	0,001	0,01	0,01	
04/03/2011		2	1397,5	1387,7	9,8	0,010	0,09	0,10	
		3	2433,8	1380,1	1053,7	1,054	9,75	9,86	
		4	3589,1	1377,7	2211,4	2,211	20,47	30,32	
		5	5611,7	1423,0	4188,7	4,189	38,77	69,09	
		Total	14428,9	6963,9	7465,0	7,465	69,09		
		Es. Sup.	Grande	3860,3	520,2	3340,1	3,340	30,91	100,00
		Total		18289,2	7484,1	10805,1	10,805	100,00	
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.									
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15L/h.									

## PAVIMENTOS PERMEABLES CON SUPERFICIES DE HORMIGÓN POROSO REFORZADO CON POLÍMEROS (ECOCRETO)

## □ Probeta Nº1

Ensayo Nº136		Pendiente: 0%				Sin colmatar		
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes	
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)
Fecha	Infiltración	1	3162,9	1420,2	1742,7	1,743	16,96	16,96
03/12/2010		2	3442,2	1375,4	2066,8	2,067	20,11	37,07
		3	6110,5	1382,5	4728,0	4,728	46,01	83,08
		4	2760,1	1390,3	1369,8	1,370	13,33	96,41
		5	1754,2	1394,6	359,6	0,360	3,50	99,91
		Total	17229,9	6963,0	10266,9	10,267	99,91	
		Es. Sup.	Grande	523,3	514,5	8,8	0,009	0,09
Total		17753,2	7477,5	10275,7	10,276	100,00		
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.								
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15L/h.								

Ensayo Nº137		Pendiente: 3%				Sin colmatar		
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes	
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)
Fecha	Infiltración	1	1431,3	1420,2	11,1	0,011	0,10	0,10
03/12/2010		2	1434,0	1375,4	58,6	0,059	0,55	0,66
		3	2075,1	1382,5	692,6	0,693	6,54	7,20
		4	5386,2	1390,3	3995,9	3,996	37,74	44,94
		5	7212,0	1394,6	5817,4	5,817	54,94	99,88
		Total	17538,6	6963,0	10575,6	10,576	99,88	
		Es. Sup.		533,2	520,2	13,0	0,013	0,12
Total		18071,8	7483,2	10588,6	10,589	100,00		
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.								
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15L/h.								

Ensayo Nº138		Pendiente: 5%				Sin colmatar		
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes	
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)
Fecha	Infiltración	1	1409,1	1395,4	13,7	0,014	0,13	0,13
03/12/2010		2	1445,5	1387,7	57,8	0,058	0,57	0,70
		3	2325,1	1380,1	945,0	0,945	9,29	9,99
		4	3998,5	1377,7	2620,8	2,621	25,76	35,75
		5	7948,2	1423,0	6525,2	6,525	64,14	99,89
		Total	17126,4	6963,9	10162,5	10,163	99,89	
		Es. Sup.	Grande	531,1	520,2	10,9	0,011	0,11
Total		17657,5	7484,1	10173,4	10,173	100,00		
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.								
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15L/h.								

Ensayo Nº139		Pendiente: 7%				Sin colmatar		
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes	
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)
Fecha	Infiltración	1	1410,2	1395,4	14,8	0,015	0,14	0,14
03/12/2010		2	1391,3	1387,7	3,6	0,004	0,03	0,17
		3	1584,2	1380,1	204,1	0,204	1,94	2,11
		4	2844,4	1377,7	1466,7	1,467	13,94	16,05
		5	10234,9	1423,0	8811,9	8,812	83,75	99,80
		Total	17465,0	6963,9	10501,1	10,501	99,80	
		Es. Sup.	Grande	541,0	520,2	20,8	0,021	0,20
Total		18006,0	7484,1	10521,9	10,522	100,00		
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.								
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15L/h.								

Ensayo Nº140		Pendiente: 10%				Sin colmatar		
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes	
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)
Fecha	Infiltración	1	1400,7	1395,4	5,3	0,005	0,05	0,05
03/12/2010		2	1389,4	1387,7	1,7	0,002	0,02	0,07
		3	1440,3	1380,1	60,2	0,060	0,59	0,66
		4	1804,9	1377,7	427,2	0,427	4,19	4,85
		5	10966,8	1423,0	9543,8	9,544	93,72	98,57
		Total	17002,1	6963,9	10038,2	10,038	98,57	
		Es. Sup.	Grande	665,8	520,2	145,6	0,146	1,43
Total		17667,9	7484,1	10183,8	10,184	100,00		
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.								
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15L/h.								

Ensayo Nº141		Pendiente: 0%				Colmatado al máximo (500gr)		
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes	
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)
Fecha	Infiltración	1	3780,4	1395,4	2385,0	2,385	23,50	23,50
20/01/2011		2	3558,6	1387,7	2170,9	2,171	21,39	44,89
		3	4445,4	1380,1	3065,3	3,065	30,20	75,08
		4	3478,9	1377,7	2101,2	2,101	20,70	95,79
		5	1831,9	1423,0	408,9	0,409	4,03	99,81
		Total	17095,2	6963,9	10131,3	10,131	99,81	
		Es. Sup.	Grande	539,0	520,2	18,8	0,019	0,19
Total		17634,2	7484,1	10150,1	10,150	100,00		
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.								
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15L/h.								

Ensayo Nº142		Pendiente: 3%				Colmatado al máximo (500gr)			
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes		
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)	
Fecha	Infiltración	1	2205,6	1395,4	810,2	0,810	7,61	7,61	
20/01/2011		2	2617,5	1387,7	1229,8	1,230	11,55	19,16	
		3	4147,8	1380,1	2767,7	2,768	26,00	45,17	
		4	4321,0	1377,7	2943,3	2,943	27,65	72,82	
		5	4196,8	1423,0	2773,8	2,774	26,06	98,87	
		Total	17488,7	6963,9	10524,8	10,525	98,87		
		Es. Sup.	Grande	640,1	520,2	119,9	0,120	1,13	100,00
		Total		18128,8	7484,1	10644,7	10,645	100,00	
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.									
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15L/h.									

Ensayo Nº143		Pendiente: 5%				Colmatado al máximo (500gr)		
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes	
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)
Fecha	Infiltración	1	1548,0	1395,4	152,6	0,153	1,50	1,50
20/01/2011		2	1738,7	1387,7	351,0	0,351	3,46	4,96
		3	3609,2	1380,1	2229,1	2,229	21,95	26,91
		4	4226,6	1377,7	2848,9	2,849	28,06	54,97
		5	5950,8	1423,0	4527,8	4,528	44,59	99,55
		Total	17073,3	6963,9	10109,4	10,109	99,55	
		Es. Sup.	Grande	565,4	520,2	45,2	0,045	0,45
Total		17638,7	7484,1	10154,6	10,155	100,00		
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.								
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15L/h.								



Ensayo Nº144		Pendiente: 7%				Colmatado al máximo (500gr)		
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes	
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)
Fecha	Infiltración	1	1413,2	1395,4	17,8	0,018	0,17	0,17
20/01/2011		2	1820,1	1387,7	432,4	0,432	4,24	4,41
		3	2847,7	1380,1	1467,6	1,468	14,39	18,80
		4	3571,3	1377,7	2193,6	2,194	21,51	40,31
		5	7455,2	1423,0	6032,2	6,032	59,14	99,45
		Total	17107,5	6963,9	10143,6	10,144	99,45	
		Es. Sup.	Grande	576,8	520,2	56,6	0,057	0,55
Total		17684,3	7484,1	10200,2	10,200	100,00		
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.								
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15L/h.								

Ensayo Nº145		Pendiente: 10%				Colmatado al máximo (500gr)		
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes	
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)
Fecha	Infiltración	1	1396,9	1395,4	1,5	0,002	0,01	0,01
20/01/2011		2	1406,7	1387,7	19,0	0,019	0,19	0,20
		3	1848,8	1380,1	468,7	0,469	4,62	4,82
		4	2882,0	1377,7	1504,3	1,504	14,83	19,65
		5	9322,5	1423,0	7899,5	7,900	77,87	97,53
		Total	16856,9	6963,9	9893,0	9,893	97,53	
		Es. Sup.	Grande	771,1	520,2	250,9	0,251	2,47
Total		17628,0	7484,1	10143,9	10,144	100,00		
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.								
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15L/h.								

Ensayo Nº146		Pendiente: 0%				Con mantenimiento (400gr)		
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes	
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)
Fecha	Infiltración	1	5708,9	1395,4	4313,5	4,314	42,92	42,92
27/01/2011		2	3150,7	1387,7	1763,0	1,763	17,54	60,46
		3	3080,7	1380,1	1700,6	1,701	16,92	77,39
		4	3064,8	1377,7	1687,1	1,687	16,79	94,17
		5	1977,1	1423,0	554,1	0,554	5,51	99,69
		Total	16982,2	6963,9	10018,3	10,018	99,69	
		Es. Sup.	Grande	551,6	520,2	31,4	0,031	100,00
		Total		17533,8	7484,1	10049,7	10,050	100,00
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.								
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15L/h.								

Ensayo Nº147		Pendiente: 3%				Con mantenimiento			
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes		
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)	
Fecha	Infiltración	1	3139,8	1395,4	1744,4	1,744	16,40	16,40	
27/01/2011		2	3504,5	1387,7	2116,8	2,117	19,90	36,31	
		3	3762,7	1380,1	2382,6	2,383	22,40	58,71	
		4	3423,8	1377,7	2046,1	2,046	19,24	77,95	
		5	3728,1	1423,0	2305,1	2,305	21,67	99,62	
		Total	17558,9	6963,9	10595,0	10,595	99,62		
		Es. Sup.	Grande	560,2	520,2	40,0	0,040	0,38	100,00
		Total		18119,1	7484,1	10635,0	10,635	100,00	
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.									
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15L/h.									

Ensayo Nº148		Pendiente: 5%				Con mantenimiento			
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes		
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)	
Fecha	Infiltración	1	1715,7	1395,4	320,3	0,320	3,01	3,01	
27/01/2011		2	3193,3	1387,7	1805,6	1,806	16,97	19,98	
		3	3992,2	1380,1	2612,1	2,612	24,56	44,54	
		4	3298,5	1377,7	1920,8	1,921	18,06	62,60	
		5	5363,0	1423,0	3940,0	3,940	37,04	99,63	
		Total	17562,7	6963,9	10598,8	10,599	99,63		
		Es. Sup.	Grande	559,1	520,2	38,9	0,039	0,37	100,00
		Total		18121,8	7484,1	10637,7	10,638	100,00	
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.									
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15L/h.									

Ensayo Nº149		Pendiente: 7%				Con mantenimiento		
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes	
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)
Fecha	Infiltración      Es. Sup.	1	1415,5	1395,4	20,1	0,020	0,19	0,19
27/01/2011		2	1993,7	1387,7	606,0	0,606	5,87	6,06
		3	4043,0	1380,1	2662,9	2,663	25,77	31,83
		4	3054,1	1377,7	1676,4	1,676	16,23	48,06
		5	6731,1	1423,0	5308,1	5,308	51,38	99,44
		Total	17237,4	6963,9	10273,5	10,274	99,44	
			Grande	578,2	520,2	58,0	0,058	0,56
Total		17815,6	7484,1	10331,5	10,332	100,00		
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.								
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15L/h.								

Ensayo Nº150		Pendiente: 10%				Con mantenimiento			
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes		
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)	
Fecha	Infiltración	1	1398,0	1395,4	2,6	0,003	0,02	0,02	
27/01/2011		2	1526,9	1387,7	139,2	0,139	1,31	1,34	
		3	2858,6	1380,1	1478,5	1,479	13,96	15,30	
		4	2919,0	1377,7	1541,3	1,541	14,56	29,86	
		5	8547,7	1423,0	7124,7	7,125	67,29	97,15	
		Total	17250,2	6963,9	10286,3	10,286	97,15		
		Es. Sup.	Grande	821,8	520,2	301,6	0,302	2,85	100,00
		Total		18072,0	7484,1	10587,9	10,588	100,00	
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.									
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15L/h.									

□ Probeta Nº2

Ensayo Nº151		Pendiente: 0%				Sin colmatar			
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes		
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)	
Fecha	Infiltración	1	1717,7	1396,8	320,9	0,321	3,26	3,26	
16/12/2010		2	4347,8	1391,9	2955,9	2,956	30,07	33,34	
		3	5742,4	1378,0	4364,4	4,364	44,41	77,75	
		4	3495,6	1378,5	2117,1	2,117	21,54	99,29	
		5	1468,1	1422,7	45,4	0,045	0,46	99,75	
		Total	16771,6	6967,9	9803,7	9,804	99,75		
		Es. Sup.	Grande	541,4	516,6	24,8	0,025	0,25	100,00
		Total		17313,0	7484,5	9828,5	9,829	100,00	
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.									
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15L/h.									

Ensayo Nº152		Pendiente: 3%				Sin colmatar			
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes		
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)	
Fecha	Infiltración	1	1430,0	1396,8	33,2	0,033	0,34	0,34	
16/12/2010		2	1980,7	1391,9	588,8	0,589	6,01	6,35	
		3	5670,1	1378,0	4292,1	4,292	43,80	50,14	
		4	4634,7	1378,5	3256,2	3,256	33,23	83,37	
		5	3015,9	1422,7	1593,2	1,593	16,26	99,63	
		Total	16731,4	6967,9	9763,5	9,764	99,63		
		Es. Sup.	Grande	553,2	516,6	36,6	0,037	0,37	100,00
		Total		17284,6	7484,5	9800,1	9,800	100,00	
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.									
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15L/h.									

Ensayo Nº153		Pendiente: 5%				Sin colmatar			
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes		
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)	
Fecha	Infiltración	1	1558,4	1396,8	161,6	0,162	1,58	1,58	
16/12/2010		2	1748,5	1391,9	356,6	0,357	3,50	5,08	
		3	4270,2	1378,0	2892,2	2,892	28,35	33,43	
		4	4772,8	1378,5	3394,3	3,394	33,28	66,71	
		5	4774,8	1422,7	3352,1	3,352	32,86	99,57	
		Total	17124,7	6967,9	10156,8	10,157	99,57		
		Es. Sup.	Grande	560,0	516,6	43,4	0,043	0,43	100,00
		Total		17684,7	7484,5	10200,2	10,200	100,00	
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.									
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15L/h.									

Ensayo Nº154		Pendiente: 7%				Sin colmatar		
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes	
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)
Fecha	Infiltración	1	1562,6	1396,8	165,8	0,166	1,57	1,57
16/12/2010		2	1620,2	1391,9	228,3	0,228	2,16	3,72
		3	3135,8	1378,0	1757,8	1,758	16,60	20,32
		4	4055,7	1378,5	2677,2	2,677	25,28	45,60
		5	7130,0	1422,7	5707,3	5,707	53,89	99,48
		Total	17504,3	6967,9	10536,4	10,536	99,48	
		Es. Sup.	Grande	571,3	516,6	54,7	0,055	0,52
Total		18075,6	7484,5	10591,1	10,591	100,00		
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.								
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15L/h.								

Ensayo Nº155		Pendiente: 10%				Sin colmatar			
		Recipiente	Peso Recipiente		Agua		Porcentajes		
			Lleno (gr)	Vacío (gr)	Peso (gr)	Vol. (L)	Parciales (%)	Acum. (%)	
Fecha	Infiltración  16/12/2010	1	1405,4	1396,8	8,6	0,009	0,09	0,09	
16/12/2010		2	1601,8	1391,9	209,9	0,210	2,17	2,25	
		3	2342,1	1378,0	964,1	0,964	9,95	12,20	
		4	2898,7	1378,5	1520,2	1,520	15,69	27,89	
		5	8256,0	1422,7	6833,3	6,833	70,52	98,41	
		Total	16504,0	6967,9	9536,1	9,536	98,41		
		Es. Sup.	Grande	670,5	516,6	153,9	0,154	1,59	100,00
		Total		17174,5	7484,5	9690,0	9,690	100,00	
Duración del ensayo: Se mide durante 20'.									
Precipitación: 60mm/h. Caudalímetros: 15L/h.									

## ANÁLISIS DE LAS TASAS DE INFILTRACIÓN DE UN PAVIMENTO PERMEABLE EN LABORATORIO. MODELOS DE REGRESIÓN.

Los modelos estadísticos de regresión lineal se obtuvieron para un nivel de confianza del 95%. En este anexo estadístico se muestran las comprobaciones de los criterios estadísticos para cada modelo. Dichos criterios son los siguientes:

- Análisis de colinealidad de variables.
- Independencia de las observaciones.
- Normalidad de los residuos no estandarizados de la variable dependiente.
- Homocedasticidad de variables.

### PAVIMENTOS PERMEABLES CON SUPERFICIES DE ADOQUINES CON RANURAS

A continuación se muestran todos los análisis estadísticos llevados a cabo para la comprobación de que los modelos de regresión lineal obtenidos cumplen con los criterios estadísticos señalados con anterioridad.

#### Superficie recién construida

Primeramente se muestran aquellos análisis realizados sobre la superficie de adoquines con ranuras para el escenario de colmatación de la superficie recién construida.

Como recordatorio del modelo de regresión lineal obtenido para los adoquines con ranuras se presenta la siguiente tabla con los coeficientes no estandarizados del modelo.

Coeficientes <sup>a</sup>						
Modelo		Coeficientes no estandarizados		Coeficientes tipificados	t	Sig.
		B	Error típ.	Beta		
1	(Constante)	10,256	2,405		4,265	,000
	Distancia de infiltración	2,049	,060	,902	34,015	,000
	Inclinación de la Superficie	-3,255	,250	-,345	-13,001	,000



Coeficientes <sup>a</sup>						
Modelo		Coeficientes no estandarizados		Coeficientes tipificados	t	Sig.
		B	Error típ.	Beta		
1	(Constante)	10,256	2,405		4,265	,000
	Distancia de infiltración	2,049	,060	,902	34,015	,000
	Inclinación de la Superficie	-3,255	,250	-,345	-13,001	,000

a. Variable dependiente: Infiltración acumulada

Seguidamente se presenta en la siguiente tabla el resumen del modelo de regresión lineal obtenido para dicho escenario de colmatación.

Resumen del modelo <sup>b</sup>										
Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error típ. de la estimación	Estadísticos de cambio					Durbin-Watson
					Cambio en R cuadrado	Cambio en F	gl1	gl2	Sig. Cambio en F	
1	,975 <sup>a</sup>	,950	,949	7,27374	,950	676,338	2	71	,000	1,337

a. Variables predictoras: (Constante), Inclinación de la Superficie, Distancia de infiltración

b. Variable dependiente: Infiltración acumulada

El valor de Durbin-Watson obtenido confirma la independencia de las observaciones.

Una vez presentado el modelo de regresión lineal, se pasa a analizar cada criterio, comenzando por el diagnóstico de la colinealidad de variables, el cual puede comprobarse en la siguiente tabla.

Diagnósticos de colinealidad <sup>a</sup>						
Modelo	Dimensión	Autovalores	Índice de condición	Proporciones de la varianza		
				(Constante)	Distancia de infiltración	Inclinación de la Superficie
1	1	2,660	1,000	,02	,02	,04
	2	,262	3,186	,02	,23	,74
	3	,078	5,835	,97	,75	,22

a. Variable dependiente: Infiltración acumulada

Igualmente, el análisis ANOVA y de correlaciones entre las variables de estudio se presentan en las siguientes dos tablas.

ANOVA<sup>b</sup>

Modelo	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1 Regresión	71566,421	2	35783,211	676,338	,000 <sup>a</sup>
Residual	3756,416	71	52,907		
Total	75322,837	73			

a. Variables predictoras: (Constante), Inclinación de la Superficie, Distancia de infiltración

b. Variable dependiente: Infiltración acumulada probeta 1

Correlaciones

		Infiltración acumulada	Distancia de infiltración	Inclinación de la Superficie
Correlación de Pearson	Infiltración acumulada	1,000	,912	-,371
	Distancia de infiltración	,912	1,000	-,029
	Inclinación de la Superficie	-,371	-,029	1,000
Sig. (unilateral)	Infiltración acumulada		,000	,001
	Distancia de infiltración	,000		,404
	Inclinación de la Superficie	,001	,404	
N	Infiltración acumulada	74	74	74
	Distancia de infiltración	74	74	74
	Inclinación de la Superficie	74	74	74

Las pruebas de normalidad realizadas sobre los residuos estandarizados de la variable dependiente para cada variable independiente se muestran a continuación, comenzando por la variable independiente distancia de infiltración.

Pruebas de normalidad

	Distancia de infiltración	Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>			Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Standardized Residual	10	,180	14	,200*	,917	14	,198
	20	,174	15	,200*	,924	15	,223
	30	,178	15	,200*	,938	15	,355

40	,205	15	,090	,833	15	,010
50	,105	15	,200*	,951	15	,536

a. Corrección de la significación de Lilliefors

\*. Este es un límite inferior de la significación verdadera.

Seguidamente se muestra la tabla con el análisis de la normalidad de los residuos estandarizados de la variable dependiente para la variable independiente inclinación de la superficie permeable.

Pruebas de normalidad							
	Inclinación de la Superficie	Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>			Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Standardized Residual	0	,204	15	,094	,861	15	,025
	3	,163	15	,200*	,899	15	,090
	5	,117	15	,200*	,920	15	,193
	7	,106	15	,200*	,951	15	,538
	10	,162	15	,200*	,922	15	,205

a. Corrección de la significación de Lilliefors

\*. Este es un límite inferior de la significación verdadera.

Por último, el análisis de la homocedasticidad se llevó a cabo mediante el análisis de la homogeneidad de varianzas de las variables, como puede verse en las dos siguientes tablas.

Prueba de homogeneidad de la varianza					
		Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
Standardized Residual	Basándose en la media	1,071	4	69	,377
	Basándose en la mediana.	,624	4	69	,647
	Basándose en la mediana	,624	4	49,624	,647
	y con gl corregido				

Prueba de homogeneidad de la varianza

		Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
Standardized Residual	Basándose en la media	1,071	4	69	,377
	Basándose en la mediana.	,624	4	69	,647
	Basándose en la mediana y con gl corregido	,624	4	49,624	,647
	Basándose en la media recortada	,978	4	69	,425

Prueba de homogeneidad de la varianza

		Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
Infiltración acumulada	Basándose en la media	,185	4	70	,945
	Basándose en la mediana.	,187	4	70	,944
	Basándose en la mediana y con gl corregido	,187	4	68,86	,944
	Basándose en la media recortada	,197	4	70	,939

Superficie colmatada

El análisis estadístico llevado a cabo sobre la superficie de adoquines con ranuras bajo un escenario de colmatación de superficie colmatada se presenta a continuación. Los coeficientes no estandarizados pueden verse en la siguiente tabla.

Modelo		Coeficientes no estandarizados		Coeficientes tipificados	T	Sig.
		B	Error típ.	Beta		
1	(Constante)	1,336	,359		3,716	,000
	Inclinación de la Superficie	-,368	,037	-,434	-9,865	,000
	Distancia de infiltración	,156	,009	,798	18,125	,000

El resumen del modelo con el valor de la  $R^2$  y el valor de Durbin-Watson pueden verse en la siguiente tabla. Dicho valor de Durbin-Watson confirma la independencia de las observaciones.

Resumen del modelo <sup>b</sup>										
Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error típ. de la estimación	Estadísticos de cambio					Durbin-Watson
					Cambio en R cuadrado	Cambio en F	gl1	gl2	Sig. Cambio en F	
1	,932 <sup>a</sup>	,869	,865	1,02824	,869	225,235	2	68	,000	1,502

a. Variables predictoras: (Constante), Distancia de infiltración, Inclinación de la Superficie

b. Variable dependiente: Infl\_Trns

Los autovalores de la siguiente tabla confirman igualmente la colinealidad de variables.

**Diagnósticos de colinealidad<sup>a</sup>**

Modelo	Dimensión	Autovalores	Índice de condición	Proporciones de la varianza		
				(Constante)	Inclinación de la Superficie	Distancia de infiltración
1	1	2,676	1,000	,02	,03	,02
	2	,250	3,271	,01	,67	,26
	3	,074	6,021	,98	,29	,71

a. Variable dependiente: Infl\_Trns

El análisis ANOVA y de correlaciones entre las variables se muestran a continuación en las dos siguientes tablas.

ANOVA<sup>b</sup>

Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	476,275	2	238,137	225,235	,000 <sup>a</sup>
	Residual	71,895	68	1,057		
	Total	548,170	70			

a. Variables predictoras: (Constante), Distancia de infiltración, Inclinación de la Superficie

b. Variable dependiente: Infl\_Trns

Correlaciones

		Infl_Trns	Inclinación de la Superficie	Distancia de infiltración
Correlación de Pearson	Infl_Trns	1,000	-,485	,825
	Inclinación de la Superficie	-,485	1,000	-,064
	Distancia de infiltración	,825	-,064	1,000
Sig. (unilateral)	Infl_Trns	.	,000	,000
	Inclinación de la Superficie	,000	.	,299
	Distancia de infiltración	,000	,299	.
N	Infl_Trns	71	71	71
	Inclinación de la Superficie	71	71	71
	Distancia de infiltración	71	71	71

Por último, el análisis de la normalidad de los residuos estandarizados de la variable dependiente se muestra a continuación, dónde puede observarse el cumplimiento de dicha premisa para todos los casos de la variable independiente distancia de infiltración

Pruebas de normalidad

	Distancia de infiltración	Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>			Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	Gl	Sig.
Standardized Residual	10	,104	14	,200 <sup>*</sup>	,985	14	,993
	20	,168	13	,200 <sup>*</sup>	,895	13	,113
	30	,107	14	,200 <sup>*</sup>	,942	14	,451
	40	,193	15	,136	,945	15	,445
	50	,143	15	,200 <sup>*</sup>	,962	15	,724

a. Corrección de la significación de Lilliefors

\*. Este es un límite inferior de la significación verdadera.

De la misma forma se comprueba en la siguiente tabla la normalidad de los residuos estandarizados de la variable dependiente con respecto a la variable independiente inclinación de la superficie permeable.

Pruebas de normalidad

	Inclinación de la Superficie	Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>			Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Standardized Residual	0	,164	11	,200 <sup>*</sup>	,925	11	,359
	3	,117	15	,200 <sup>*</sup>	,982	15	,981
	5	,212	15	,068	,888	15	,062
	7	,137	15	,200 <sup>*</sup>	,962	15	,720
	10	,125	15	,200 <sup>*</sup>	,981	15	,978

a. Corrección de la significación de Lilliefors

\*. Este es un límite inferior de la significación verdadera.

Por otra parte, la homocedasticidad de variables queda demostrada a continuación en las dos siguientes tablas, tanto para el caso de la variable distancia de infiltración como para el caso de la variable inclinación de la superficie respectivamente.

## Prueba de homogeneidad de la varianza

		Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
Standardized Residual	Basándose en la media	1,971	4	66	,109
	Basándose en la mediana.	1,667	4	66	,168
	Basándose en la mediana y con gl corregido	1,667	4	62,605	,169
	Basándose en la media recortada	1,960	4	66	,111

**Prueba de homogeneidad de la varianza**

		Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
Standardized Residual	Basándose en la media	,780	4	66	,542
	Basándose en la mediana.	,653	4	66	,627
	Basándose en la mediana y con gl corregido	,653	4	61,803	,627
	Basándose en la media recortada	,773	4	66	,547



**PAVIMENTOS PERMEABLES CON SUPERFICIES DE HORMIGÓN POROSO REFORZADO CON POLÍMEROS**

En esta ocasión se presenta el análisis estadístico para la superficie permeable de hormigón poroso reforzado con polímeros.

Superficie recién construida

En primer lugar se pueden observar los coeficientes no estandarizados del modelo de regresión lineal obtenido para una superficie recién construida sin aporte de sedimentos.

Coeficientes <sup>a</sup>						
Modelo		Coeficientes no estandarizados		Coeficientes tipificados	t	Sig.
		B	Error típ.	Beta		
1	(Constante)	6,262	4,354		1,438	6,262
	Distancia de infiltración	2,074	,111	,845	18,637	2,074
	Inclinación de la Superficie	-3,774	,462	-,370	-8,168	-3,774

a. Variable dependiente: Infiltración acumulada

A continuación se presenta la tabla resumen del modelo con los valores de  $R^2$  y de Durbin-Watson para el análisis de la independencia de las observaciones.

Resumen del modelo <sup>b</sup>										
Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error típ. de la estimación	Estadísticos de cambio					Durbin-Watson
					Cambio en R cuadrado	Cambio en F	gl1	gl2	Sig. Cambio en F	
1	,923 <sup>a</sup>	,852	,848	13,62858	,852	207,029	2	72	,000	,897

a. Variables predictoras: (Constante), Inclinación de la Superficie, Distancia de infiltración

b. Variable dependiente: Infiltración acumulada

El valor de Durbin-Watson obtenido confirma la independencia de las observaciones.

Una vez presentado el modelo de regresión lineal, se pasa a analizar cada criterio,

comenzando por el diagnóstico de la colinealidad de variables, el cual puede comprobarse en la siguiente tabla.

Diagnósticos de colinealidad <sup>a</sup>						
Modelo	Dimensión	Autovalores	Índice de condición	Proporciones de la varianza		
				(Constante)	Distancia de infiltración	Inclinación de la Superficie
1	1	2,654	1,000	,02	,02	,04
	2	,264	3,173	,02	,22	,77
	3	,082	5,676	,96	,75	,20

a. Variable dependiente: Infiltración acumulada

Igualmente, el análisis ANOVA y de correlaciones entre las variables de estudio se presentan en las siguientes dos tablas.

ANOVA <sup>b</sup>					
Modelo	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Regresión	76906,226	2	38453,113	207,029	,000 <sup>b</sup>
Residual	13373,153	72	185,738		
1 Total	90279,379	74			

a. Variables predictoras: (Constante), Inclinación de la Superficie, Distancia de infiltración

b. Variable dependiente: Infiltración acumulada probeta 1

Correlaciones				
		Infiltración acumulada	Distancia de infiltración	Inclinación de la Superficie
Correlación de Pearson	Infiltración acumulada	1,000	,845	-,370
	Distancia de infiltración	,845	1,000	,000
	Inclinación de la Superficie	-,370	,000	1,000
Sig. (unilateral)	Infiltración acumulada	.	,000	,001
	Distancia de infiltración	,000	.	,500
	Inclinación de la Superficie	,001	,500	.
N	Infiltración acumulada	75	75	75
	Distancia de infiltración	75	75	75
	Inclinación de la Superficie	75	75	75

Las pruebas de normalidad realizadas sobre los residuos estandarizados de la

variable dependiente para cada variable independiente se muestran a continuación, comenzando por la variable independiente distancia de infiltración.

Pruebas de normalidad							
	Distancia de infiltración	Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>			Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Standardized Residual	10	,208	15	,079	,927	15	,244
	20	,160	15	,200 <sup>*</sup>	,936	15	,339
	30	,096	15	,200 <sup>*</sup>	,968	15	,824
	40	,166	15	,200 <sup>*</sup>	,949	15	,514
	50	,136	15	,200 <sup>*</sup>	,925	15	,231

a. Corrección de la significación de Lilliefors

\*. Este es un límite inferior de la significación verdadera.

Seguidamente se muestra la tabla con el análisis de la normalidad de los residuos estandarizados de la variable dependiente para la variable independiente inclinación de la superficie permeable.

Pruebas de normalidad							
	Inclinación de la Superficie	Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>			Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Standardized Residual	0	,189	15	,158	,960	15	,695
	3	,134	15	,200 <sup>*</sup>	,963	15	,741
	5	,153	15	,200 <sup>*</sup>	,954	15	,585
	7	,171	15	,200 <sup>*</sup>	,914	15	,154
	10	,135	15	,200 <sup>*</sup>	,933	15	,303

a. Corrección de la significación de Lilliefors

\*. Este es un límite inferior de la significación verdadera.

Por último, el análisis de la homocedasticidad se llevó a cabo mediante el análisis de la homogeneidad de varianzas de las variables, como puede verse en las dos siguientes tablas.

#### Prueba de homogeneidad de la varianza

		Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
Standardized Residual	Basándose en la media	1,694	4	70	,161
	Basándose en la mediana.	1,405	4	70	,241
	Basándose en la mediana y con gl corregido	1,405	4	57,995	,244
	Basándose en la media recortada	1,607	4	70	,182

**Prueba de homogeneidad de la varianza**

		Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
Infiltración acumulada	Basándose en la media	1,433	4	70	,232
	Basándose en la mediana.	1,321	4	70	,271
	Basándose en la mediana y con gl corregido	1,321	4	67,386	,271
	Basándose en la media recortada	1,442	4	70	,229

Superficie colmatada

En primer lugar se presentan los coeficientes no estandarizados del modelo de regresión lineal obtenido para una superficie recién construida sin aporte de sedimentos.

Coeficientes <sup>a</sup>						
Modelo		Coeficientes no estandarizados		Coeficientes tipificados	t	Sig.
		B	Error típ.	Beta		
1	(Constante)	7,741	3,882		1,994	7,741
	Distancia de infiltración	2,094	,099	,846	21,164	2,094
	Inclinación de la Superficie	-4,158	,415	-,400	-10,007	-4,158

a. Variable dependiente: Infiltración acumulada

A continuación se puede observar la tabla resumen del modelo con los valores de  $R^2$  y de Durbin-Watson para el análisis de la independencia de las observaciones.

Resumen del modelo <sup>b</sup>										
Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error típ. de la estimación	Estadísticos de cambio					Durbin-Watson
					Cambio en R cuadrado	Cambio en F	gl1	gl2	Sig. Cambio en F	
1	,942 <sup>a</sup>	,886	,883	12,07343	,886	277,103	2	71	,000	1,049

a. Variables predictoras: (Constante), Inclinación de la Superficie, Distancia de infiltración

b. Variable dependiente: Infiltración acumulada

El valor de Durbin-Watson obtenido confirma la independencia de las observaciones.

Una vez presentado el modelo de regresión lineal, se pasa a analizar cada criterio, comenzando por el diagnóstico de la colinealidad de variables, el cual puede comprobarse en la siguiente tabla.

Diagnósticos de colinealidad<sup>a</sup>

Modelo	Dimensión	Autovalores	Índice de condición	Proporciones de la varianza		
				(Constante)	Distancia de infiltración	Inclinación de la Superficie
1	1	2,648	1,000	,02	,02	,04
	2	,269	3,137	,02	,23	,75
	3	,083	5,666	,97	,75	,21

a. Variable dependiente: Infiltración acumulada

Igualmente, el análisis ANOVA y de correlaciones entre las variables de estudio se presentan en las siguientes dos tablas.

ANOVA<sup>b</sup>

Modelo	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Regresión	80785,295	2	40392,647	277,103	,000 <sup>b</sup>
Residual	10349,504	71	145,768		
1 Total	91134,799	73			

a. Variables predictoras: (Constante), Inclinación de la Superficie, Distancia de infiltración

b. Variable dependiente: Infiltración acumulada probeta 1

Correlaciones

		Infiltración acumulada	Distancia de infiltración	Inclinación de la Superficie
Correlación de Pearson	Infiltración acumulada	1,000	,852	-,412
	Distancia de infiltración	,852	1,000	-,014
	Inclinación de la Superficie	-,412	-,014	1,000
Sig. (unilateral)	Infiltración acumulada	.	,000	,000
	Distancia de infiltración	,000	.	,452
	Inclinación de la Superficie	,000	,452	.
N	Infiltración acumulada	74	74	74
	Distancia de infiltración	74	74	74
	Inclinación de la Superficie	74	74	74

Las pruebas de normalidad realizadas sobre los residuos estandarizados de la variable dependiente para cada variable independiente se muestran a continuación, comenzando por la variable independiente distancia de infiltración.

Pruebas de normalidad							
	Distancia de infiltración	Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>			Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Standardized Residual	10	,091	15	,200*	,976	15	,937
	20	,148	15	,200*	,972	15	,885
	30	,132	15	,200*	,941	15	,395
	40	,167	14	,200*	,907	14	,141
	50	,151	15	,200*	,928	15	,251

a. Corrección de la significación de Lilliefors

\*. Este es un límite inferior de la significación verdadera.

Seguidamente se muestra la tabla con el análisis de la normalidad de los residuos estandarizados de la variable dependiente para la variable independiente inclinación de la superficie permeable.

Pruebas de normalidad							
	Inclinación de la Superficie	Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>			Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Standardized Residual	0	,166	15	,200*	,942	15	,406
	3	,153	15	,200*	,962	15	,720
	5	,173	15	,200*	,912	15	,148
	7	,151	15	,200*	,927	15	,247
	10	,205	14	,114	,920	14	,221

a. Corrección de la significación de Lilliefors

\*. Este es un límite inferior de la significación verdadera.

Por último, el análisis de la homocedasticidad se llevó a cabo mediante el análisis de la homogeneidad de varianzas de las variables, como puede verse en las dos siguientes tablas.

Prueba de homogeneidad de la varianza

		Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
Standardized Residual	Basándose en la media	1,443	4	69	,229
	Basándose en la mediana.	1,368	4	69	,254
	Basándose en la mediana y con gl corregido	1,368	4	65,023	,255
	Basándose en la media recortada	1,492	4	69	,214

Prueba de homogeneidad de la varianza

		Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
Infiltración acumulada	Basándose en la media	1,704	4	69	,159
	Basándose en la mediana.	1,023	4	69	,402
	Basándose en la mediana y con gl corregido	1,023	4	62,125	,402
	Basándose en la media recortada	1,735	4	69	,152



**PAVIMENTOS PERMEABLES CON SUPERFICIES DE ASFALTO POROSO**Superficie recién construida

En primer lugar se presentan los coeficientes no estandarizados del modelo de regresión lineal obtenido para una superficie recién construida sin aporte de sedimentos.

Coeficientes <sup>a</sup>					
Modelo		Coeficientes no estandarizados		Coeficientes tipificados	
		B	Error típ.	Beta	
1	(Constante)	8,868	4,517		1,963
	Distancia de infiltración	2,044	,115	,758	17,805
	Inclinación de la Superficie	-4,406	,478	-,481	-11,302

a. Variable dependiente: Infiltración acumulada

A continuación se puede observar la tabla resumen del modelo con los valores de  $R^2$  y de Durbin-Watson para el análisis de la independencia de las observaciones.

Resumen del modelo <sup>b</sup>										
Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error típ. de la estimación	Estadísticos de cambio					Durbin-Watson
					Cambio en R cuadrado	Cambio en F	gl1	gl2	Sig. Cambio en F	
1	,936 <sup>a</sup>	,876	,872	13,39833	,876	243,617	2	69	,000	,870

a. Variables predictoras: (Constante), Inclinación de la Superficie, Distancia de infiltración

b. Variable dependiente: Infiltración acumulada

El valor de Durbin-Watson obtenido confirma la independencia de las observaciones.

Una vez presentado el modelo de regresión lineal, se pasa a analizar cada criterio, comenzando por el diagnóstico de la colinealidad de variables, el cual puede comprobarse en la siguiente tabla.

Diagnósticos de colinealidad<sup>a</sup>

Modelo	Dimensión	Autovalores	Índice de condición	Proporciones de la varianza		
				(Constante)	Distancia de infiltración	Inclinación de la Superficie
1	1	2,633	1,000	,02	,02	,04
	2	,290	3,013	,01	,22	,69
	3	,077	5,845	,97	,76	,27

a. Variable dependiente: Infiltración acumulada

Igualmente, el análisis ANOVA y de correlaciones entre las variables de estudio se presentan en las siguientes dos tablas.

ANOVA<sup>b</sup>

Modelo	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Regresión	87465,870	2	43732,935	243,617	,000 <sup>b</sup>
Residual	12386,549	69	179,515		
1 Total	99852,419	71			

a. Variables predictoras: (Constante), Inclinación de la Superficie, Distancia de infiltración

b. Variable dependiente: Infiltración acumulada probeta 1

## Correlaciones

		Infiltración acumulada	Distancia de infiltración	Inclinación de la Superficie
Correlación de Pearson	Infiltración acumulada	1,000	,804	-,553
	Distancia de infiltración	,804	1,000	-,095
	Inclinación de la Superficie	-,553	-,095	1,000
Sig. (unilateral)	Infiltración acumulada	.	,000	,000
	Distancia de infiltración	,000	.	,214
	Inclinación de la Superficie	,000	,214	.
N	Infiltración acumulada	72	72	72
	Distancia de infiltración	72	72	72
	Inclinación de la Superficie	72	72	72

Las pruebas de normalidad realizadas sobre los residuos estandarizados de la

variable dependiente para cada variable independiente se muestran a continuación, comenzando por la variable independiente distancia de infiltración.

Pruebas de normalidad							
	Distancia de infiltración	Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>			Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Standardized Residual	10	,122	15	,200*	,928	15	,256
	20	,146	15	,200*	,950	15	,518
	30	,095	15	,200*	,965	15	,774
	40	,208	15	,080	,909	15	,131
	50	,174	12	,200*	,887	12	,109

a. Corrección de la significación de Lilliefors

\*. Este es un límite inferior de la significación verdadera.

Seguidamente se muestra la tabla con el análisis de la normalidad de los residuos estandarizados de la variable dependiente para la variable independiente inclinación de la superficie permeable.

Pruebas de normalidad							
	Inclinación de la Superficie	Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>			Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Standardized Residual	0	,212	15	,067	,909	15	,132
	3	,217	15	,055	,931	15	,280
	5	,132	15	,200*	,941	15	,393
	7	,179	15	,200*	,938	15	,353
	10	,179	12	,200*	,860	12	,048

a. Corrección de la significación de Lilliefors

\*. Este es un límite inferior de la significación verdadera.

Por último, el análisis de la homocedasticidad se llevó a cabo mediante el análisis de la homogeneidad de varianzas de las variables, como puede verse en las dos siguientes tablas.

#### Prueba de homogeneidad de la varianza

		Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
Standardized Residual	Basándose en la media	1,764	4	67	,146
	Basándose en la mediana.	1,649	4	67	,172
	Basándose en la mediana y con gl corregido	1,649	4	61,644	,173
	Basándose en la media recortada	1,751	4	67	,149

**Prueba de homogeneidad de la varianza**

		Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
Infiltración acumulada	Basándose en la media	1,302	4	67	,278
	Basándose en la mediana.	,977	4	67	,426
	Basándose en la mediana y con gl corregido	,977	4	61,750	,427
	Basándose en la media recortada	1,321	4	67	,271

Superficie colmatada

En primer lugar se presentan los coeficientes no estandarizados del modelo de regresión lineal obtenido para una superficie recién construida sin aporte de sedimentos.

Coeficientes <sup>a</sup>						
Modelo		Coeficientes no estandarizados		Coeficientes tipificados	t	Sig.
		B	Error típ.	Beta		
1	(Constante)	1,324	,371		3,565	1,324
	Distancia de infiltración	,213	,009	,849	22,406	,213
	Inclinación de la Superficie	-,436	,039	-,419	-11,057	-,436

a. Variable dependiente: Infiltración acumulada

A continuación se puede observar la tabla resumen del modelo con los valores de  $R^2$  y de Durbin-Watson para el análisis de la independencia de las observaciones.

Resumen del modelo <sup>b</sup>										
Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error típ. de la estimación	Estadísticos de cambio					Durbin-Watson
					Cambio en R cuadrado	Cambio en F	gl1	gl2	Sig. Cambio en F	
1	,947 <sup>a</sup>	,897	,894	1,16228	,897	312,153	2	72	,000	1,581

a. Variables predictoras: (Constante), Inclinación de la Superficie, Distancia de infiltración

b. Variable dependiente: Infiltración acumulada

El valor de Durbin-Watson obtenido confirma la independencia de las observaciones.

Una vez presentado el modelo de regresión lineal, se pasa a analizar cada criterio, comenzando por el diagnóstico de la colinealidad de variables, el cual puede comprobarse en la siguiente tabla.

Diagnósticos de colinealidad<sup>a</sup>

Modelo	Dimensión	Autovalores	Índice de condición	Proporciones de la varianza		
				(Constante)	Distancia de infiltración	Inclinación de la Superficie
1	1	2,654	1,000	,02	,02	,04
	2	,264	3,173	,02	,22	,77
	3	,082	5,676	,96	,75	,20

a. Variable dependiente: Infiltración acumulada

Igualmente, el análisis ANOVA y de correlaciones entre las variables de estudio se presentan en las siguientes dos tablas.

ANOVA<sup>b</sup>

Modelo	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Regresión	843,368	2	421,684	312,153	,000 <sup>b</sup>
Residual	97,264	72	1,351		
1 Total	940,632	74			

a. Variables predictoras: (Constante), Inclinación de la Superficie, Distancia de infiltración

b. Variable dependiente: Infiltración acumulada probeta 1

Correlaciones

		Infiltración acumulada	Distancia de infiltración	Inclinación de la Superficie
Correlación de Pearson	Infiltración acumulada	1,000	,849	-,419
	Distancia de infiltración	,849	1,000	,000
	Inclinación de la Superficie	-,419	,000	1,000
Sig. (unilateral)	Infiltración acumulada	.	,000	,000
	Distancia de infiltración	,000	.	,500
	Inclinación de la Superficie	,000	,500	.
N	Infiltración acumulada	75	75	75
	Distancia de infiltración	75	75	75
	Inclinación de la Superficie	75	75	75

Las pruebas de normalidad realizadas sobre los residuos estandarizados de la variable dependiente para cada variable independiente se muestran a continuación, comenzando por la variable independiente distancia de infiltración.

Pruebas de normalidad							
Distancia de infiltración		Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>			Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Standardized Residual	10	,129	15	,200*	,958	15	,660
	20	,158	15	,200*	,972	15	,883
	30	,176	15	,200*	,857	15	,022
	40	,204	15	,093	,848	15	,016
	50	,122	15	,200*	,956	15	,617

a. Corrección de la significación de Lilliefors

\*. Este es un límite inferior de la significación verdadera.

Seguidamente se muestra la tabla con el análisis de la normalidad de los residuos estandarizados de la variable dependiente para la variable independiente inclinación de la superficie permeable.

Pruebas de normalidad							
Inclinación de la Superficie		Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>			Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Standardized Residual	0	,174	15	,200*	,890	15	,067
	3	,102	15	,200*	,967	15	,806
	5	,135	15	,200*	,962	15	,719
	7	,168	15	,200*	,886	15	,058
	10	,165	15	,200*	,963	15	,738

a. Corrección de la significación de Lilliefors

\*. Este es un límite inferior de la significación verdadera.

Por último, el análisis de la homocedasticidad se llevó a cabo mediante el análisis de la homogeneidad de varianzas de las variables, como puede verse en las dos siguientes tablas.

Prueba de homogeneidad de la varianza

		Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
Standardized Residual	Basándose en la media	,883	4	70	,479
	Basándose en la mediana.	,839	4	70	,505
	Basándose en la mediana y con gl corregido	,839	4	68,528	,505
	Basándose en la media recortada	,915	4	70	,460

Prueba de homogeneidad de la varianza

		Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
Infiltración acumulada	Basándose en la media	1,990	4	70	,105
	Basándose en la mediana.	1,714	4	70	,157
	Basándose en la mediana y con gl corregido	1,714	4	62,404	,158
	Basándose en la media recortada	1,962	4	70	,110





## **ANEXO 2. ENSAYOS DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO DE UN FIRME PERMEABLE EN LABORATORIO**



**SECCIÓN DE FIRME PERMEABLE CONTROL**

A continuación se muestran los resultados de los ensayos realizados sobre las probetas de sección permeable denominadas CONTROL. Se realizaron un total de 9 ensayos, divididos en 3 intensidades de lluvia diferentes (400, 200 y 100 mm/h) sobre tres probetas de sección idéntica. Cada una de las tablas que se muestran a continuación contiene los valores medios registrados en las 3 probetas para cada intensidad de lluvia estudiada.

Intensidad de lluvia (mm/h) = 400		SECCIÓN TIPO CONTROL		
		Tiempo (segundos)	Volumen (ml)	Tasa de infiltración (ml/min)
CONTROL 400 Ensayos Nº: 1, 2 y 3.	Fase inicial (Zona A)	20	0	0
	Fase inicial + Fase estacionaria (Zona B)	60	40	40
		120	155	115
		180	410	255
		240	670	260
		300	930	260
		360	1200	270
		420	1470	270
		480	1740	270
		540	2010	270
		600	2290	280
		660	2570	280
		720	2850	280
		780	3130	280
		840	3410	280
		900	3690	280
	Fase de descarga (Zona C)	960	3950	260
		1020	4015	65
		1080	4045	30
		1140	4065	20
		1200	4075	10
		1260	4080	5
		1340	4080	0
	Infiltración	60000	4390	—



Intensidad de lluvia (mm/h) = 200		SECCIÓN TIPO CONTROL		
		Tiempo (segundos)	Volumen (ml)	Tasa de infiltración (ml/min)
CONTROL 200 Ensayos Nº: 4, 5 y 6.	Fase inicial (Zona A)	20	0	0
	Fase inicial + Fase estacionaria (Zona B)	60	20	20
		120	50	30
		180	100	50
		240	180	80
		300	290	110
		360	405	115
		420	520	115
		480	635	115
		540	750	115
		600	880	130
		660	1010	130
		720	1140	130
		780	1270	130
		840	1400	130
		900	1530	130
	Fase de descarga (Zona C)	960	1610	80
		1020	1640	30
		1080	1660	20
		1140	1675	15
		1200	1680	5
		1260	1680	0
		1340	1680	0
	Infiltración	60000	1980	—

Intensidad de lluvia (mm/h) = 100		SECCIÓN TIPO CONTROL		
		Tiempo (segundos)	Volumen (ml)	Tasa de infiltración (ml/min)
CONTROL 100 Ensayos Nº: 7, 8 y 9.	Fase inicial (Zona A)	30	0	0
	Fase inicial + Fase estacionaria (Zona B)	60	5	5
		120	15	10
		180	35	20
		240	60	25
		300	105	45
		360	155	50
		420	205	50
		480	255	50
		540	310	55
		600	370	60
		660	430	60
		720	490	60
		780	550	60
		840	610	60
		900	670	60
	Fase de descarga (Zona C)	960	725	55
		1020	755	30
		1080	780	25
		1140	790	10
		1200	795	5
		1260	795	0
		1340	795	0
	Infiltración	60000	1085	—

**SECCIÓN DE FIRME PERMEABLE OASIS 1.3**

A continuación se muestran los resultados de los ensayos realizados sobre las probetas de sección permeable denominadas OASIS 1,3. Se realizaron un total de 9 ensayos, divididos en 3 intensidades de lluvia diferentes (400, 200 y 100 mm/h) sobre tres probetas de sección idéntica.

<b>Intensidad de lluvia (mm/h) = 400</b>		<b>SECCIÓN TIPO OASIS 1,3</b>		
		<b>Tiempo (segundos)</b>	<b>Volumen (ml)</b>	<b>Tasa de infiltración (ml/min)</b>
<b>OASIS 1,3 Ensayos Nº: 10.</b>	<b>Fase inicial (Zona A)</b>	180	0	0
	<b>Fase inicial + Fase estacionaria (Zona B)</b>	240	100	100
		300	235	135
		360	375	140
		420	535	160
		480	700	165
		540	1000	300
		600	1200	200
		660	1440	240
		720	1680	240
		780	1920	240
		840	2180	260
		900	2470	290
		960	2750	280
		1020	3030	280
		1080	3310	280
		1140	3590	280
		1200	3870	280
	<b>Fase de descarga (Zona C)</b>	1260	3945	75
		1320	3990	45
		1380	4015	25
		1440	4030	15
		1500	4040	10
		1560	4045	5
		1620	4045	0
	<b>Remanente</b>	60000	4575	—





Intensidad de lluvia (mm/h) = 400		SECCIÓN TIPO OASIS 1,3		
		Tiempo (segundos)	Volumen (ml)	Tasa de infiltración (ml/min)
OASIS 1,3 Ensayos Nº: 11.	Fase inicial (Zona A)	180	0	0
	Fase inicial + Fase estacionaria (Zona B)	240	25	25
		300	75	50
		360	160	85
		420	340	180
		480	540	200
		540	760	220
		600	980	220
		660	1230	250
		720	1480	250
		780	1730	250
		840	1985	255
		900	2240	255
		960	2505	265
		1020	2780	275
		1080	3060	280
		1140	3340	280
		1200	3620	280
	Fase de descarga (Zona C)	1260	3730	110
		1320	3800	70
		1380	3840	40
		1440	3870	30
		1500	3885	15
		1560	3895	10
		1620	3900	5
	Remanente	60000	4505	—

Intensidad de lluvia (mm/h) = 400		SECCIÓN TIPO OASIS 1,3		
		Tiempo (segundos)	Volumen (ml)	Tasa de infiltración (ml/min)
OASIS 1,3 Ensayos Nº: 12.	Fase inicial (Zona A)	180	0	0
	Fase inicial + Fase estacionaria (Zona B)	240	75	75
		300	175	100
		360	310	135
		420	485	175
		480	700	215
		540	940	240
		600	1180	240
		660	1420	240
		720	1660	240
		780	1905	245
		840	2175	270
		900	2445	270
		960	2715	270
		1020	2995	280
		1080	3275	280
		1140	3555	280
		1200	3835	280
	Fase de descarga (Zona C)	1260	3905	70
		1320	3955	50
		1380	3980	25
		1440	3990	10
		1500	3995	5
		1560	4000	5
		1620	4000	0
	Remanente	60000	4400	—

Intensidad de lluvia (mm/h) = 200		SECCIÓN TIPO OASIS 1,3		
		Tiempo (segundos)	Volumen (ml)	Tasa de infiltración (ml/min)
OASIS 1,3 Ensayos Nº: 13.	Fase inicial (Zona A)	540	0	0
	Fase inicial + Fase estacionaria (Zona B)	600	80	80
		660	170	90
		720	270	100
		780	370	100
		840	470	100
		900	580	110
		960	695	115
		1020	815	120
		1080	935	120
		1140	1055	120
		1200	1175	120
		1260	1295	120
		1320	1415	120
		1380	1535	120
		1440	1655	120
		1500	1775	120
		1560	1895	120
		1620	2020	125
		1680	2145	125
		1740	2280	135
		1800	2415	135
		1860	2550	135
		1920	2680	130
		1980	2810	130
		2040	2940	130
	Fase de descarga (Zona C)	2100	3000	60
		2160	3040	40
		2220	3050	10
		2280	3055	5
		2340	3060	5
		2400	3060	0
	Remanente	60000	3575	—

Intensidad de lluvia (mm/h) = 200		SECCIÓN TIPO OASIS 1,3		
		Tiempo (segundos)	Volumen (ml)	Tasa de infiltración (ml/min)
OASIS 1,3 Ensayos Nº: 14.	Fase inicial (Zona A)	300	0	0
	Fase inicial + Fase estacionaria (Zona B)	360	60	60
		420	130	70
		480	205	75
		540	280	75
		600	360	80
		660	460	100
		720	565	105
		780	670	105
		840	775	105
		900	880	105
		960	990	110
		1020	1100	110
		1080	1210	110
		1140	1325	115
		1200	1445	120
		1260	1565	120
		1320	1690	125
		1380	1820	130
		1440	1945	125
		1500	2075	130
		1560	2205	130
		1620	2335	130
		1680	2470	135
		1740	2605	135
		1800	2740	135
		1860	2875	135
		1920	3010	135
		1980	3145	135
		2040	3280	135
	Fase de descarga (Zona C)	2100	3320	40
		2160	3340	20
		2220	3280	10
		2280	3320	10
		2340	3340	5
		2400	3340	0
	Remanente	60000	3625	—

Intensidad de lluvia (mm/h) = 200		SECCIÓN TIPO OASIS 1,3		
		Tiempo (segundos)	Volumen (ml)	Tasa de infiltración (ml/min)
OASIS 1,3 Ensayos Nº: 15.	Fase inicial (Zona A)	540	0	0
	Fase inicial + Fase estacionaria (Zona B)	600	75	75
		660	165	90
		720	260	95
		780	360	100
		840	460	100
		900	570	110
		960	680	110
		1020	790	110
		1080	895	105
		1140	1005	110
		1200	1125	120
		1260	1255	130
		1320	1385	130
		1380	1515	130
		1440	1645	130
		1500	1775	130
		1560	1905	130
		1620	2035	130
		1680	2165	130
		1740	2295	130
		1800	2430	135
		1860	2560	130
		1920	2690	130
		1980	2820	130
		2040	2950	130
	Fase de descarga (Zona C)	2100	3020	70
		2160	3070	50
		2220	3080	10
		2280	3085	5
		2340	3090	5
		2400	3090	0
	Remanente	60000	3610	—

Intensidad de lluvia (mm/h) = 100		SECCIÓN TIPO OASIS 1,3		
		Tiempo (segundos)	Volumen (ml)	Tasa de infiltración (ml/min)
OASIS 1,3 Ensayos Nº: 16.	Fase inicial (Zona A)	870	0	0
	Fase inicial + Fase estacionaria (Zona B)	960	50	50
		1020	90	40
		1080	135	45
		1140	175	40
		1200	220	45
		1260	265	45
		1320	310	45
		1380	355	45
		1440	400	45
		1500	450	50
		1560	500	50
		1620	550	50
		1680	605	55
		1740	660	55
		1800	715	55
		1860	770	55
		1920	825	55
		1980	885	60
		2040	945	60
		2100	1010	65
		2160	1075	65
		2220	1140	65
		2280	1200	60
		2340	1265	65
		2400	1330	65
	Fase de descarga (Zona C)	2460	1375	45
		2520	1410	35
		2580	1430	20
		2640	1445	15
		2700	1455	10
		2760	1460	5
		2820	1465	5
		2880	1465	0
	Remanente	86400	1660	—

Intensidad de lluvia (mm/h) = 100		SECCIÓN TIPO OASIS 1,3		
		Tiempo (segundos)	Volumen (ml)	Tasa de infiltración (ml/min)
OASIS 1,3 Ensayos Nº: 17.	Fase inicial (Zona A)	900	0	0
	Fase inicial + Fase estacionaria (Zona B)	960	15	15
		1020	35	20
		1080	60	25
		1140	90	30
		1200	120	30
		1260	150	30
		1320	190	40
		1380	230	40
		1440	270	40
		1500	315	45
		1560	360	45
		1620	405	45
		1680	450	45
		1740	500	50
		1800	550	50
		1860	600	50
		1720	655	55
		1780	710	55
		1840	765	55
		1900	820	55
		1960	875	55
		2040	935	60
		2100	995	60
		2160	1055	60
		2220	1115	60
		2280	1175	60
		2340	1235	60
		2400	1295	60
		2460	1355	60
	Fase de descarga (Zona C)	2520	1400	45
		2580	1435	35
		2640	1450	15
		2700	1465	15
		2760	1475	10



		2820	1480	5
		2880	1480	0
	Remanente	86400	1730	—

Intensidad de lluvia (mm/h) = 100		SECCIÓN TIPO OASIS 1,3		
		Tiempo (segundos)	Volumen (ml)	Tasa de infiltración (ml/min)
OASIS 1,3 Ensayos Nº: 18.	Fase inicial (Zona A)	720	0	0
	Fase inicial + Fase estacionaria (Zona B)	780	25	25
		840	60	35
		900	95	35
		960	130	35
		1020	170	40
		1080	215	45
		1140	260	45
		1200	305	45
		1260	350	45
		1320	400	50
		1380	450	50
		1440	500	50
		1500	550	50
		1560	605	55
		1620	660	55
		1680	715	55
		1740	770	55
		1800	825	55
		1860	880	55
		1920	940	60
		1980	1000	60
		2040	1060	60
		2100	1120	60
		2160	1185	65
		2220	1245	60
		2280	1305	60
		2340	1365	60
		2400	1425	60
	Fase de descarga (Zona C)	2460	1480	55
		2520	1515	35
		2580	1535	20
		2640	1540	5
		2700	1545	5
		2760	1545	0
	Remanente	86400	1700	—

**SECCIÓN DE FIRME PERMEABLE OASIS 2.0**

A continuación se muestran los resultados de los ensayos realizados sobre las probetas de sección permeable denominadas OASIS 2,0. Se realizaron un total de 9 ensayos, divididos en 3 intensidades de lluvia diferentes (400, 200 y 100 mm/h) sobre tres probetas de sección idéntica.

Intensidad de lluvia (mm/h) = 400		SECCIÓN TIPO OASIS 2,0		
		Tiempo (segundos)	Volumen (ml)	Tasa de infiltración (ml/min)
OASIS 2,0 Ensayos N°: 19.	Fase inicial (Zona A)	360	0	0
	Fase inicial + Fase estacionaria (Zona B)	420	100	100
		480	200	100
		540	350	150
		600	500	150
		660	700	200
		720	930	230
		780	1180	250
		840	1430	250
		900	1690	260
		960	1940	250
		1020	2200	260
		1080	2470	270
		1140	2750	280
		1200	3030	280
		1260	3310	280
		1320	3590	280
		1380	3870	280
	Fase de descarga (Zona C)	1440	3935	65
		1500	3950	15
		1560	3960	10
		1620	3965	5
		1680	3970	5
		1740	3970	0
	Remanente	60000	4650	—

Intensidad de lluvia (mm/h) = 400		SECCIÓN TIPO OASIS 2,0		
		Tiempo (segundos)	Volumen (ml)	Tasa de infiltración (ml/min)
OASIS 2,0 Ensayos Nº: 20.	Fase inicial (Zona A)	330	0	0
	Fase inicial + Fase estacionaria (Zona B)	360	75	75
		420	160	85
		480	260	100
		540	410	150
		600	565	155
		660	755	190
		720	950	195
		780	1160	210
		840	1390	230
		900	1640	250
		960	1900	260
		1020	2165	265
		1080	2435	270
		1140	2700	265
		1200	2970	270
		1260	3250	280
		1320	3530	280
		1380	3810	280
		1440	4090	280
	Fase de descarga (Zona C)	1500	4175	85
		1560	4200	25
		1620	4215	15
		1680	4220	5
		1740	4220	0
	Remanente	60000	4800	—

Intensidad de lluvia (mm/h) = 400		SECCIÓN TIPO OASIS 2,0		
		Tiempo (segundos)	Volumen (ml)	Tasa de infiltración (ml/min)
OASIS 2,0 Ensayos N°: 21.	Fase inicial (Zona A)	330	0	0
	Fase inicial + Fase estacionaria (Zona B)	360	80	80
		420	170	90
		480	270	100
		540	390	120
		600	530	140
		660	680	150
		720	860	180
		780	1080	220
		840	1310	230
		900	1550	240
		960	1800	250
		1020	2070	270
		1080	2340	270
		1140	2610	270
		1200	2890	280
		1260	3170	280
		1320	3450	280
		1380	3730	280
		1440	4010	280
	Fase de descarga (Zona C)	1500	4170	160
		1560	4250	80
		1620	4270	20
		1680	4285	15
		1740	4295	10
		1800	4300	0
		1860	4300	0
	Remanente	60000	4900	—

Intensidad de lluvia (mm/h) = 200		SECCIÓN TIPO OASIS 2,0		
		Tiempo (segundos)	Volumen (ml)	Tasa de infiltración (ml/min)
OASIS 2,0 Ensayos N°: 22.	Fase inicial (Zona A)	600	0	0
	Fase inicial + Fase estacionaria (Zona B)	660	40	40
		720	90	50
		780	160	70
		840	235	75
		900	315	80
		960	395	80
		1020	475	80
		1080	555	80
		1140	660	105
		1200	770	110
		1260	880	110
		1320	990	110
		1380	1105	115
		1440	1220	115
		1500	1330	110
		1560	1450	120
		1620	1570	120
		1680	1690	120
		1740	1815	125
		1800	1930	115
		1860	2050	120
		1920	2180	130
		1980	2310	130
		2040	2440	130
		2100	2570	130
	Fase de descarga (Zona C)	2160	2635	65
		2220	2660	25
		2280	2675	15
		2340	2685	10
		2400	2690	5
		2460	2690	0
	Remanente	60000	2940	—

Intensidad de lluvia (mm/h) = 200		SECCIÓN TIPO OASIS 2,0		
		Tiempo (segundos)	Volumen (ml)	Tasa de infiltración (ml/min)
OASIS 2,0 Ensayos N°: 23.	Fase inicial (Zona A)	720	0	0
	Fase inicial + Fase estacionaria (Zona B)	780	40	40
		840	110	70
		900	185	75
		960	260	75
		1020	340	80
		1080	420	80
		1140	500	80
		1200	590	90
		1260	685	95
		1320	790	105
		1380	910	120
		1440	1030	120
		1500	1155	125
		1560	1280	125
		1620	1410	130
		1680	1540	130
		1740	1670	130
		1800	1800	130
		1860	1930	130
		1920	2060	130
		1980	2190	130
		2040	2320	130
		2100	2450	130
	Fase de descarga (Zona C)	2160	2515	65
		2220	2540	25
		2280	2555	15
		2340	2565	10
		2400	2570	5
		2460	2570	0
	Remanente	60000	3050	—

Intensidad de lluvia (mm/h) = 200		SECCIÓN TIPO OASIS 2,0		
		Tiempo (segundos)	Volumen (ml)	Tasa de infiltración (ml/min)
OASIS 2,0 Ensayos N°: 24.	Fase inicial (Zona A)	720	0	0
	Fase inicial + Fase estacionaria (Zona B)	780	50	50
		840	100	50
		900	160	60
		960	240	80
		1020	320	80
		1080	410	90
		1140	500	90
		1200	605	105
		1260	710	105
		1320	820	110
		1380	940	120
		1440	1060	120
		1500	1190	130
		1560	1320	130
		1620	1450	130
		1680	1580	130
		1740	1710	130
		1800	1840	130
		1860	1970	130
		1920	2100	130
		1980	2230	130
		2040	2360	130
		2100	2490	130
	Fase de descarga (Zona C)	2160	2565	75
		2220	2595	30
		2280	2605	10
		2340	2610	5
		2400	2610	0
	Remanente	60000	2910	—



Intensidad de lluvia (mm/h) = 100		SECCIÓN TIPO OASIS 2,0		
		Tiempo (segundos)	Volumen (ml)	Tasa de infiltración (ml/min)
OASIS 2,0 Ensayos N°: 25.	Fase inicial (Zona A)	1020	0	0
	Fase inicial + Fase estacionaria (Zona B)	1080	10	10
		1140	25	15
		1200	50	25
		1260	70	20
		1320	100	30
		1380	130	30
		1440	155	25
		1500	185	30
		1560	215	30
		1620	250	35
		1680	290	40
		1740	330	40
		1800	370	40
		1860	415	45
		1920	460	45
		1980	510	50
		2040	555	45
		2100	605	50
		2160	655	50
		2220	710	55
		2280	760	50
		2340	815	55
		2400	875	60
		2460	925	50
		2520	980	55
		2580	1030	50
		2640	1090	60
		2700	1145	55
		2760	1205	60
		2820	1260	55
		2880	1320	60
		2940	1385	65
		3000	1445	60
		3060	1500	55
		3120	1560	60

		3180	1620	60
		3240	1680	60
		3300	1740	60
		3360	1800	60
		3420	1860	60
		3480	1920	60
		3540	1980	60
		3600	2045	65
		3660	2115	70
		3720	2180	65
		3780	2245	65
		3840	2310	65
		3900	2370	60
		3960	2430	60
		4020	2490	60
		4080	2555	65
		4140	2615	60
		4200	2675	60
	<b>Fase de descarga (Zona C)</b>	4260	2720	45
		4320	2755	35
		4380	2780	25
		4440	2800	20
		4500	2810	10
		4560	2815	5
		4560	2820	5
	<b>Remanente</b>	64800	3000	—

Intensidad de lluvia (mm/h) = 100		SECCIÓN TIPO OASIS 2,0		
		Tiempo (segundos)	Volumen (ml)	Tasa de infiltración (ml/min)
OASIS 2,0 Ensayos Nº: 26.	Fase inicial (Zona A)	1260	0	0
	Fase inicial + Fase estacionaria (Zona B)	1380	30	30
		1440	45	15
		1500	60	15
		1560	90	30
		1620	125	35
		1680	160	35
		1740	200	40
		1800	240	40
		1860	280	40
		1920	320	40
		1980	365	45
		2040	410	45
		2100	460	50
		2160	505	45
		2220	555	50
		2280	605	50
		2340	655	50
		2400	710	55
		2460	765	55
		2520	825	60
		2580	885	60
		2640	945	60
		2700	1000	55
		2760	1060	60
		2820	1120	60
		2880	1180	60
		2940	1235	55
		3000	1290	55
		3060	1345	55
		3120	1400	55
		3180	1455	55
		3240	1510	55
		3300	1565	55
		3360	1625	60
		3420	1680	55

		3480	1740	60
		3540	1800	60
		3600	1860	60
		3660	1920	60
		3720	1980	60
		3780	2040	60
		3840	2100	60
		3900	2160	60
		3960	2220	60
		4000	2280	60
		4060	2340	60
		4120	2400	60
	<b>Fase de descarga (Zona C)</b>	4180	2455	55
		4240	2485	30
		4300	2495	10
		4360	2505	10
		4440	2510	5
		4500	2510	0
	<b>Remanente</b>	50000	2950	—

Intensidad de lluvia (mm/h) = 100		SECCIÓN TIPO OASIS 2,0		
		Tiempo (segundos)	Volumen (ml)	Tasa de infiltración (ml/min)
OASIS 2,0 Ensayos N°: 27.	Fase inicial (Zona A)	1380	0	0
	Fase inicial + Fase estacionaria (Zona B)	1440	25	25
		1500	60	35
		1560	95	35
		1620	135	40
		1680	180	45
		1740	225	45
		1800	265	40
		1860	310	45
		1920	360	50
		1980	410	50
		2040	455	45
		2100	505	50
		2160	555	50
		2220	610	55
		2280	660	50
		2340	715	55
		2400	770	55
		2460	825	55
		2520	880	55
		2580	935	55
		2640	985	50
		2700	1040	55
		2760	1100	60
		2820	1160	60
		2880	1220	60
		2940	1280	60
		3000	1340	60
		3060	1400	60
		3120	1460	60
		3180	1520	60
		3240	1580	60
		3300	1640	60
		3360	1700	60
		3420	1760	60
		3480	1815	55

		3540	1875	60
		3600	1935	60
		3660	1995	60
		3720	2055	60
		3780	2120	65
		3840	2180	60
		3900	2245	65
		3960	2310	65
		4020	2370	60
		4080	2430	60
		4141	2490	60
		4200	2550	60
	<b>Fase de descarga (Zona C)</b>	4260	2595	45
		4320	2625	30
		4380	2650	25
		4440	2670	20
		4500	2685	15
		4560	2690	5
		4620	2690	0
	<b>Remanente</b>	46800	3200	—

### **ANEXO 3. ENSAYO DE MEDIDA DE LA DRENABILIDAD DE SUPERFICIES DE HORMIGÓN POROSO Y ASFALTO POROSO**





## ENSAYOS DE MEDIDA DE LA DRENABILIDAD EN LABORATORIO

## SUPERFICIES DE AGLOMERADO POROSO DE HORMIGÓN POROSO REFORZADO CON POLÍMEROS

Ensayo Nº	Punto	Probeta	Tiempo (s)	Tiempo medio (s)	Permeabilidad (m/s)	Permeabilidad media (m/s)	Permeabilidad media (m/s)
1	1	3	15	19	0,0167	0,0135	0,0088
2	2	3	22		0,0114		
3	3	3	20		0,0125		
4	4	3	47	34	0,0053	0,0080	
5	5	3	25		0,0100		
6	6	3	29		0,0086		
7	7	3	41	41	0,0061	0,0063	
8	8	3	50		0,0050		
9	9	3	32		0,0078		
10	10	3	46	36	0,0054	0,0073	
11	11	3	31		0,0081		
12	12	3	30		0,0083		
13	13	3	11	12	0,0227	0,0211	0,0165
14	14	3	16		0,0156		
15	15	3	10		0,0250		
16	16	3	26	18	0,0096	0,0152	
17	17	3	13		0,0192		
18	18	3	15		0,0167		
19	19	3	22	20	0,0114	0,0130	
20	20	3	16		0,0156		
21	21	3	21		0,0119		
22	22	3	15	16	0,0167	0,0167	
23	23	3	12		0,0208		
24	24	3	20		0,0125		
25	1	2	18	32	0,0139	0,0092	0,0080
26	2	2	50		0,0050		
27	3	2	29		0,0086		
28	4	2	25	49	0,0100	0,0069	
29	5	2	92		0,0027		
30	6	2	31		0,0081		
31	7	2	33	45	0,0076	0,0079	
32	8	2	83		0,0030		
33	9	2	19		0,0132		
34	10	2	30	32	0,0083	0,0081	

35	11	2	25		0,0100		
36	12	2	42		0,0060		
37	13	2	20	17	0,0125	0,0146	0,0149
38	14	2	16		0,0156		
39	15	2	16		0,0156		
40	16	2	16	23	0,0156	0,0122	
41	17	2	18		0,0139		
42	18	2	36		0,0069		
43	19	2	12	21	0,0208	0,0145	
44	20	2	16		0,0156		
45	21	2	35		0,0071		
46	22	2	14	14	0,0179	0,0185	
47	23	2	15		0,0167		
48	24	2	12		0,0208		
49	1	1	20	20	0,0125	0,0127	0,0096
50	2	1	17		0,0147		
51	3	1	23		0,0109		
52	4	1	26	25	0,0096	0,0102	
53	5	1	23		0,0109		
54	6	1	25		0,0100		
55	7	1	40	34	0,0063	0,0081	
56	8	1	21		0,0119		
57	9	1	41		0,0061		
58	10	1	45	35	0,0056	0,0075	
59	11	1	31		0,0081		
60	12	1	28		0,0089		
61	13	1	10	13	0,0250	0,0203	0,0167
62	14	1	11		0,0227		
63	15	1	19		0,0132		
64	16	1	19	21	0,0132	0,0121	
65	17	1	21		0,0119		
66	18	1	22		0,0114		
67	19	1	15	13	0,0167	0,0195	
68	20	1	11		0,0227		
69	21	1	13		0,0192		
70	22	1	16	17	0,0156	0,0147	
71	23	1	15		0,0167		
72	24	1	21		0,0119		

## SUPERFICIES DE AGLOMERADO POROSO DE ASFALTO POROSO PA-16

Ensayo Nº	Punto	Probeta	Tiempo (s)	Tiempo medio (s)	Permeabilidad (m/s)	Permeabilidad media (m/s)	Permeabilidad media (m/s)
1	1	2	45	72	0,0056	0,0038	0,0045
2	2	2	98		0,0026		
3	3	2	74		0,0034		
4	4	2	73	76	0,0034	0,0036	
5	5	2	50		0,0050		
6	6	2	106		0,0024		
7	7	2	67	53	0,0037	0,0048	
8	8	2	49		0,0051		
9	9	2	44		0,0057		
10	10	2	51	45	0,0049	0,0056	
11	11	2	44		0,0057		
12	12	2	40		0,0063		
13	13	2	29	43	0,0086	0,0063	0,0081
14	14	2	42		0,0060		
15	15	2	57		0,0044		
16	16	2	26	31	0,0096	0,0083	
17	17	2	31		0,0081		
18	18	2	35		0,0071		
19	19	2	30	29	0,0083	0,0088	
20	20	2	26		0,0096		
21	21	2	30		0,0083		
22	22	2	28	28	0,0089	0,0089	
23	23	2	25		0,0100		
24	24	2	32		0,0078		
25	1	3	76	89	0,0033	0,0028	0,0033
26	2	3	95		0,0026		
27	3	3	97		0,0026		
28	4	3	115	77	0,0022	0,0036	
29	5	3	56		0,0045		
30	6	3	59		0,0042		
31	7	3	124	112	0,0020	0,0023	
32	8	3	132		0,0019		
33	9	3	81		0,0031		
34	10	3	57	55	0,0044	0,0045	
35	11	3	56		0,0045		

36	12	3	53		0,0047		
37	13	3	43	43	0,0058	0,0059	0,0053
38	14	3	48		0,0052		
39	15	3	38		0,0066		
40	16	3	59	47	0,0042	0,0054	
41	17	3	43		0,0058		
42	18	3	40		0,0063		
43	19	3	49	52	0,0051	0,0049	
44	20	3	60		0,0042		
45	21	3	47		0,0053		
46	22	3	76	54	0,0033	0,0050	
47	23	3	40		0,0063		
48	24	3	46		0,0054		
49	1	1	72	100	0,0035	0,0027	0,0024
50	2	1	91		0,0027		
51	3	1	137		0,0018		
52	4	1	125	119	0,0020	0,0021	
53	5	1	131		0,0019		
54	6	1	102		0,0025		
55	7	1	105	119	0,0024	0,0021	
56	8	1	121		0,0021		
57	9	1	130		0,0019		
58	10	1	95	91	0,0026	0,0028	
59	11	1	109		0,0023		
60	12	1	70		0,0036		
61	13	1	71	65	0,0035	0,0039	0,0040
62	14	1	60		0,0042		
63	15	1	63		0,0040		
64	16	1	62	63	0,0040	0,0040	
65	17	1	65		0,0038		
66	18	1	61		0,0041		
67	19	1	59	64	0,0042	0,0039	
68	20	1	62		0,0040		
69	21	1	72		0,0035		
70	22	1	60	61	0,0042	0,0042	
71	23	1	49		0,0051		
72	24	1	74		0,0034		

## ENSAYOS DE MEDIDA DE LA DRENABILIDAD EN CAMPO

A continuación se muestran los resultados obtenidos con el permeámetro LCS en las plazas de aparcamiento con firmes permeables de superficies de aglomerados porosos de hormigón poroso reforzado con polímeros y de asfalto poroso PA-12.

## PLAZAS DE FIRME PERMEABLE CON SUPERFICIES DE AGLOMERADO POROSO DE HORMIGÓN POROSO REFORZADO CON POLÍMEROS

Test Nº	Plaza Nº	Punto de medida	Tiempo (segundos)	Permeabilidad (m/s)	Reducción Permeabilidad (%)	Porcentaje superficie porosa (%)	Permeabilidad media (m/s)
1	29	1	59	0,0042	78,81	100	0,0037
2	29	2	56	0,0045	77,68		
3	29	3	65	0,0038	80,77		
4	29	4	47	0,0053	73,40		
5	29	5	37	0,0068	66,22		
6	29	6	240	0,0010	94,79		
7	29	7	182	0,0014	93,13		
8	29	8	64	0,0039	80,47		
9	29	9	108	0,0023	88,43		
10	30	1	79	0,0032	84,18	89	0,0031
11	30	2	30	0,0083	58,33		
12	30	3	75	0,0033	83,33		
13	30	4	> 300	0,0000	100,00		
14	30	5	205	0,0012	93,90		
15	30	6	260	0,0010	95,19		
16	30	7	49	0,0051	74,49		
17	30	8	64	0,0039	80,47		
18	30	9	126	0,0020	90,08		
19	31	1	45	0,0056	72,22	100	0,0045
20	31	2	39	0,0064	67,95		
21	31	3	41	0,0061	69,51		
22	31	4	64	0,0039	80,47		
23	31	5	87	0,0029	85,63		

24	<b>31</b>	6	56	0,0045	77,68		
25	<b>31</b>	7	58	0,0043	78,45		
26	<b>31</b>	8	52	0,0048	75,96		
27	<b>31</b>	9	118	0,0021	89,41		
28	<b>32</b>	1	294	0,0009	95,75	<b>67</b>	<b>0,0026</b>
29	<b>32</b>	2	100	0,0025	87,50		
30	<b>32</b>	3	48	0,0052	73,96		
31	<b>32</b>	4	76	0,0033	83,55		
32	<b>32</b>	5	24	0,0104	47,92		
33	<b>32</b>	6	248	0,0010	94,96		
34	<b>32</b>	<b>7</b>	> 300	0,0000	100,00		
35	<b>32</b>	<b>8</b>	> 300	0,0000	100,00		
36	<b>32</b>	<b>9</b>	> 300	0,0000	100,00		
37	<b>33</b>	1	40	0,0063	68,75	<b>67</b>	<b>0,0025</b>
38	<b>33</b>	2	29	0,0086	56,90		
39	<b>33</b>	3	114	0,0022	89,04		
40	<b>33</b>	4	156	0,0016	91,99		
41	<b>33</b>	5	145	0,0017	91,38		
42	<b>33</b>	6	121	0,0021	89,67		
43	<b>33</b>	<b>7</b>	> 300	0,0000	100,00		
44	<b>33</b>	<b>8</b>	> 300	0,0000	100,00		
45	<b>33</b>	<b>9</b>	> 300	0,0000	100,00		
46	<b>34</b>	1	46	0,0054	72,83	<b>100</b>	<b>0,0048</b>
47	<b>34</b>	2	44	0,0057	71,59		
48	<b>34</b>	3	40	0,0063	68,75		
49	<b>34</b>	4	57	0,0044	78,07		
50	<b>34</b>	5	56	0,0045	77,68		
51	<b>34</b>	6	156	0,0016	91,99		
52	<b>34</b>	7	49	0,0051	74,49		
53	<b>34</b>	8	44	0,0057	71,59		
54	<b>34</b>	9	55	0,0045	77,27		
55	<b>35</b>	1	29	0,0086	56,90	<b>89</b>	<b>0,0046</b>
56	<b>35</b>	2	30	0,0083	58,33		
57	<b>35</b>	3	47	0,0053	73,40		

58	<b>35</b>	<b>4</b>	> 300	0,0000	100,00		
59	<b>35</b>	5	29	0,0086	56,90		
60	<b>35</b>	6	121	0,0021	89,67		
61	<b>35</b>	7	72	0,0035	82,64		
62	<b>35</b>	8	85	0,0029	85,29		
63	<b>35</b>	9	125	0,0020	90,00		
64	<b>36</b>	1	99	0,0025	87,37	<b>100</b>	<b>0,0050</b>
65	<b>36</b>	2	29	0,0086	56,90		
66	<b>36</b>	3	38	0,0066	67,11		
67	<b>36</b>	4	82	0,0030	84,76		
68	<b>36</b>	5	117	0,0021	89,32		
69	<b>36</b>	6	42	0,0060	70,24		
70	<b>36</b>	7	43	0,0058	70,93		
71	<b>36</b>	8	45	0,0056	72,22		
72	<b>36</b>	9	50	0,0050	75,00		
73	<b>37</b>	<b>1</b>	> 300	0,0000	100,00	<b>89</b>	<b>0,0062</b>
74	<b>37</b>	2	28	0,0089	55,36		
75	<b>37</b>	3	70	0,0036	82,14		
76	<b>37</b>	4	39	0,0064	67,95		
77	<b>37</b>	5	25	0,0100	50,00		
78	<b>37</b>	6	80	0,0031	84,38		
79	<b>37</b>	7	26	0,0096	51,92		
80	<b>37</b>	8	27	0,0093	53,70		
81	<b>37</b>	9	50	0,0050	75,00		
Media (%)						<b>89</b>	<b>0,0041</b>

**PLAZAS DE FIRME PERMEABLE CON SUPERFICIES DE AGLOMERADO POROSO DE ASFALTO POROSO PA-12**

Test Nº	Plaza Nº	Punto de medida	Tiempo (segundos)	Permeabilidad (m/s)	Reducción Permeabilidad (%)	Porcentaje superficie porosa (%)	Permeabilidad media (m/s)
1	20	1	> 300	0,0000	100,00	56	0,0012
2	20	2	> 300	0,0000	100,00		
3	20	3	> 300	0,0000	100,00		
4	20	4	> 300	0,0000	100,00		
5	20	5	84	0,0030	75,20		
6	20	6	178	0,0014	88,30		
7	20	7	128	0,0020	83,72		
8	20	8	102	0,0025	79,58		
9	20	9	144	0,0017	85,53		
10	21	1	101	0,0025	79,37	89	0,0020
11	21	2	133	0,0019	84,34		
12	21	3	55	0,0045	62,12		
13	21	4	202	0,0012	89,69		
14	21	5	100	0,0025	79,17		
15	21	6	280	0,0009	92,56		
16	21	7	> 300	0,0000	100,00		
17	21	8	104	0,0024	79,97		
18	21	9	135	0,0019	84,57		
19	22	1	> 300	0,0000	100,00	56	0,0007
20	22	2	134	0,0019	84,45		
21	22	3	> 300	0,0000	100,00		
22	22	4	> 300	0,0000	100,00		
23	22	5	126	0,0020	83,47		
24	22	6	230	0,0011	90,94		
25	22	7	> 300	0,0000	100,00		
26	22	8	> 300	0,0000	100,00		
27	22	9	240	0,0010	91,32		
28	23	1	284	0,0009	92,66	78	0,0010
29	23	2	118	0,0021	82,34		
30	23	3	216	0,0012	90,35		
31	23	4	188	0,0013	88,92		
32	23	5	192	0,0013	89,15		
33	23	6	218	0,0011	90,44		



34	23	7	> 300	0,0000	100,00		
35	23	8	> 300	0,0000	100,00		
36	23	9	364	0,0007	94,28		
37	24	1	288	0,0009	92,77	100	0,0020
38	24	2	63	0,0040	66,93		
39	24	3	188	0,0013	88,92		
40	24	4	106	0,0024	80,35		
41	24	5	104	0,0024	79,97		
42	24	6	110	0,0023	81,06		
43	24	7	200	0,0013	89,58		
44	24	8	106	0,0024	80,35		
45	24	9	176	0,0014	88,16		
46	25	1	104	0,0024	79,97	100	0,0027
47	25	2	148	0,0017	85,92		
48	25	3	96	0,0026	78,30		
49	25	4	64	0,0039	67,45		
50	25	5	55	0,0045	62,12		
51	25	6	100	0,0025	79,17		
52	25	7	76	0,0033	72,59		
53	25	8	140	0,0018	85,12		
54	25	9	222	0,0011	90,62		
55	26	1	62	0,0040	66,40	89	0,0034
56	26	2	44	0,0057	52,65		
57	26	3	112	0,0022	81,40		
58	26	4	66	0,0038	68,43		
59	26	5	58	0,0043	64,08		
60	26	6	42	0,0060	50,40		
61	26	7	131	0,0019	84,10		
62	26	8	> 300	0,0000	100,00		
63	26	9	81	0,0031	74,28		
64	27	1	35	0,0071	40,48	100	0,0065
65	27	2	35	0,0071	40,48		
66	27	3	35	0,0071	40,48		
67	27	4	35	0,0071	40,48		
68	27	5	35	0,0071	40,48		
69	27	6	70	0,0036	70,24		
70	27	7	35	0,0071	40,48		
71	27	8	35	0,0071	40,48		
72	27	9	50	0,0050	58,33		
73	28	1	> 300	0,0000	100,00	100	0,0000

74	28	2	> 300	0,0000	100,00		
75	28	3	> 300	0,0000	100,00		
76	28	4	> 300	0,0000	100,00		
77	28	5	> 300	0,0000	100,00		
78	28	6	> 300	0,0000	100,00		
79	28	7	> 300	0,0000	100,00		
80	28	8	> 300	0,0000	100,00		
81	28	9	> 300	0,0000	100,00		
Media (%)						85	0,0022